



Universidad EAFIT

Escuela de Ingenierías

Departamento de Ingeniería Mecánica

Simulación del proceso de gasificación de biomasa

**Tesis: Presentada como requisito parcial para obtener el grado
de magister en ingeniería**

Presentado a

MSc. Ing. Luis Santiago parís Londoño

Elaborado por

Rafael Andrés González García

Julio de 2016

Simulación del proceso de gasificación de biomasa

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Medellín - Antioquia, (DD/MM/AAAA)

Índice de General:

Listado de Tablas:	3
Listado de Gráficos:	5
Listado de Figuras:	6
Resumen	7
Abstract	8
1. Introducción	9
1.1. Objetivo General	12
1.2. Objetivos Específicos	12
2. Marco teórico	13
2.2. La sachá Inchi y su beneficio	15
2.1.1 Sitios y ciudades del país donde se elabora industrialmente	18
3. Estado del arte	46
4. Metodología	51
4.1. Definición de Reacciones y Parámetros Involucrados	52
4.2. Balance atómico de las reacciones principales	57
4.2.1. Reacción de combustión primaria o estequiométrica	57
4.2.2. Reacción de combustión secundaria	58
4.3. Avances de las reacciones químicas combinadas	61
4.3.1. Análisis de las reacciones del carbono	63
4.3.2. Análisis de las reacciones del hidrógeno	64
4.3.3. Análisis de las reacciones del oxígeno	65

4.3.4. Balance de energía general para la obtención de la temperatura final de los gases de salida	66
4.3.5. Cinética Química, la determinación de los valores A, E y la función $g\alpha$	69
4.3.6. Regresión estadística para la obtención de la función $g(\alpha)/A$ y la constante E...	71
4.4. Descripción de la lógica del programa	73
4.5. Uso del programa para la caracterización del gas obtenido	77
5. Resultados.....	79
5.1. Resultados del programa de simulación para la cascarilla de café.....	79
5.2. Resultados del programa de simulación para la cascarilla Sacha Inchi	80
6. Conclusiones.....	97
7. Anexos	100
Bibliografía	103

Listado de Tablas:

Tabla 2-1 Tipos de biomasa. (Biomass Users Network (BUN-CA), 2002).....	20
Tabla 2-2 Rango de poder calorífico del gas producido, de acuerdo al medio gasificante (Basu, 2013).	33
Tabla 2-3 Reacciones típicas de gasificación a 25°C (Basu, 2013).	36
Tabla 2-4 Constantes de equilibrio y calores de formación para 5 reacciones de gasificación (Basu, 2013).	43
Tabla 4-1 Valores máximos y mínimos de los parámetros de estimación para la creación de una base de datos.	72
Tabla 4-2 Valores de entrada masa molecular empírica de la biomasa y condiciones iniciales para la cascarilla de café (Rodriguez, 2011).	77
Tabla 4-3 Valores de entrada masa molecular empírica de la biomasa y condiciones iniciales para la cascarilla de Sacha Inchi.	78
Tabla 5-1 Correlación lineal de la Integral I vs Temperatura.	79
Tabla 5-2 Correlación lineal de Energía de Activación Teórica (Eteo) vs X.	79
Tabla 5-3 Correlación lineal de la Integral I vs Temperatura.	80
Tabla 5-4 Correlación lineal de Energía de Activación Teórica (Eteo) vs X.	80
Tabla 5-5 Contenido energético del gas de salida a diferentes condiciones.	81
Tabla 5-6 Características del gas de salida en el punto de máxima energía.	86
Tabla 5-7 Coeficientes de Correlación lineal de $g(\alpha)/A$ vs tiempo.	86
Tabla 5-8 Coeficientes de Correlación lineal de Eteo vs x.	87
Tabla 5-9 Coeficientes de Correlación lineal de Eteo vs ER.	88
Tabla 5-10 Coeficientes de Correlación lineal de J/gr vs x.	89
Tabla 5-11 Coeficientes de Correlación lineal de J/gr vs ER.	90
Tabla 5-12 Coeficientes de Correlación lineal de r vs α	91
Tabla 5-13 Coeficientes de Correlación lineal de r vs ER.	92
Tabla 5-14 propiedades energéticas del gas de síntesis de sachá Inchi con y sin adición de vapor de agua.	94

Tabla 5-15 propiedades energéticas de distintos gases como referencia comparativa.	95
Tabla 7-1 Datos termodinámicos presentes en el archivo binario Dh.mat. El archivo contiene sólo los valores	101

Listado de Gráficos:

Gráfico 5-1 Temperatura final [K] vs ER para diferentes condiciones de X.	82
Gráfico 5-2 Entalpía sensible [J/gr] vs ER para diferentes condiciones de X.	83
Gráfico 5-3 Entalpía de combustión [J/gr] vs ER para diferentes condiciones de X.	84
Gráfico 5-4 Contenido energético total [J/gr] vs ER para diferentes condiciones de X.	85
Gráfico 5-5 Correlación lineal de $g(\alpha)/A$ vs tiempo.	87
Gráfico 5-6 Correlación lineal de E_{teo} vs x.	88
Gráfico 5-7 Correlación lineal de E_{teo} vs ER.	89
Gráfico 5-8 Correlación lineal de J/gr vs x.	90
Gráfico 5-9 Correlación lineal de J/gr vs ER.	91
Gráfico 5-10 Correlación lineal de r vs α	92
Gráfico 5-11 Correlación lineal de r vs ER.	93
Gráfico 5-12 Comparación poderes caloríficos inferiores GN, GLP, Cascarilla Vs “syngas” Sacha Inchi.	95

Listado de Figuras:

Figura 2-1 Fruto y hojas de sachá Inchi. (Gulteros, 2014)	15
Figura 2-2 Proceso de beneficio de la sachá Inchi. Adaptada de (Reforesta Perú SAC, 2009)	17
Figura 2-3 Presencia de sachá Inchi en el territorio colombiano (Valencia, 2011, pág. 14).	19
Figura 2-4 Diagrama C-H-O para el proceso de gasificación, C carbono, H hidrógeno, O oxígeno, S vapor (“steam”), P pirólisis lenta, F pirólisis rápida (“Fast”). (Basu, 2013).	34
Figura 2-5 Rutas potenciales de gasificación (Basu, 2013).	35
Figura 2-6 Pirólisis, gasificación y combustión en una cerilla encendida (Reed, 1998). ...	40
Figura 2-7 Esquemático de un gasificador de lecho movedizo tipo “downdraft” (Basu, 2013).	41
Figura 4-1 Diagrama de flujo del programa.....	76

Resumen

La tendencia actual en el mundo de los energéticos es intentar disminuir el uso de combustibles fósiles y disminuir la dependencia que la humanidad tiene de ellos. Se ha buscado reemplazar a los combustibles fósiles con otras fuentes de energía que tengan un menor impacto sobre el medio ambiente, como es la biomasa. Existen diferentes opciones para aprovechar el recurso biomásico, siendo la más popular la combustión directa. También es posible obtener de la biomasa diversos productos combustibles a través de distintos procesos, como la carbonización (pirólisis) para obtener carbón vegetal, fermentación alcohólica para obtener bioetanol, esterificación para obtener biodiesel, y gasificación para obtener biogás. Esta última opción, se puede realizar a través de bacterias en lo que se conoce como gasificación anaeróbica, o por medio de procesos termoquímicos, que se conoce como gasificación pirolítica. Es la gasificación pirolítica el objeto de estudio de este trabajo, por lo tanto, a partir de ahora será referida simplemente como gasificación. El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un programa de simulación numérica que permita conocer el comportamiento de la biomasa en un proceso de gasificación y las características del gas que dicha biomasa produciría, como su composición y contenido energético. Se eligió el programa MATLAB¹ para el desarrollo del simulador. El simulador puede ser utilizado con cualquier biomasa de la que se conozca su composición (C, H, O, N, S). Se expone la técnica que se siguió para plantear y resolver el problema de la simulación numérica del proceso de gasificación y se describe la lógica detrás del programa que se escribió en MATLAB para tal propósito.

¹ Abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices", herramienta de software matemático.

Abstract

The current tendency in the energy world is to try to reduce the usage of fossil fuels and to reduce the humanity's dependence on them. It has been sought to replace fossil fuels with other energy sources that has a lower negative environmental impact. There are different options to exploit the biomass resource, being the most popular direct combustion. It is also possible to obtain from biomass various combustible products through different processes, such like carbonization (pyrolysis) to obtain charcoal, alcoholic fermentation to obtain bioethanol, esterification to obtain biodiesel, and gasification to obtain biogas. This last option can be accomplished through bacteria, in what is known as anaerobic gasification, or by thermochemical process, which is known as pyrolytic gasification. Pyrolytic gasification is the objective of this study, therefore, from now on it will refer to as gasification. The goal of this work, is the development of a numeric simulation program that allows to know the behavior of the biomass in a gasification process and the characteristics of the gas obtained from such biomass, like its composition and energetic content. The software MATLAB² was chosen for the development of the simulator. The simulator can be used with any biomass which composition is known (C, H, O, N, and S). The technique that was followed to state and solve the problem of the numerical simulation of the gasification process is exposed, and the logic behind the program that was written in MATLAB for such purpose is described.

² Abbreviation of MATrix LABoratory, "matrix laboratory" mathematical software tool.

1. Introducción

La industrialización que se vive actualmente es posible gracias al uso de combustibles para impulsar la maquinaria de la cual se sirve la sociedad y obtiene energía para satisfacer sus necesidades. Los combustibles empleados a partir de la revolución industrial han sido principalmente de tipo fósil: carbón, petróleo y gas, aunque la tendencia actual es tratar de reemplazar el uso de estos combustibles fósiles por otros, preferiblemente renovables, que no presenten los inconvenientes ambientales y económicos de éstos.

Las características que se buscan en un combustible son, entre otras: alta densidad energética, fácil obtención, manejo y almacenaje, bajo costo y bajo impacto ambiental. Aunque ésta última característica, desafortunadamente no siempre es importante para la selección de un combustible, paulatinamente está cobrando fuerza, ya sea a causa de la conciencia ambiental de la industria, o más frecuentemente, debido a beneficios fiscales por reducción de impacto ambiental.

Una de las clasificaciones que se pueden emplear con los combustibles es de acuerdo con su estado de agregación, esto es, se pueden encontrar combustibles en estado sólido, líquido y gaseoso. Diferentes aplicaciones requieren diferentes tipos de combustibles, donde algunos de ellos tienen ventaja sobre los demás. Así, por ejemplo, los combustibles sólidos tienden a poseer una mayor densidad energética, pero la combustión se dificulta y se hace ineficiente por el tamaño de las partículas y el tipo de combustión en sí misma presenta (Sólido-Gas). Los combustibles líquidos son fáciles de transportar, almacenar y distribuir, además de que la combustión se realiza con mayor eficiencia que en el caso de los sólidos, pero para lograr una buena combustión, se requieren de sistemas que preparen el combustible y lo atomicen, lo cual complica un poco los sistemas. En el caso de los combustibles gaseosos, no es necesario atomizarlos y su combustión es muy fácil y eficiente, pero pueden presentar problemas por cambios de volumen y corrosión en las tuberías.

Debido a sus características, los combustibles gaseosos son preferidos, entre otras aplicaciones, para alimentar equipos de combustión externa en la industria, donde el objetivo es obtener calor de proceso y/o potencia motriz para accionar maquinas térmicas y generadores eléctricos.

Gran parte de los combustibles consumidos por la industria provienen de fuentes no renovables como son los combustibles fósiles, lo cual conlleva problemas asociados con este tipo de recursos. Por estas razones, la industria en general ha buscado nuevas fuentes de combustibles que cumplan con las condiciones técnicas, económicas y ambientales apropiadas.

Una de las opciones que puede cubrir estas necesidades son los biocombustibles, los cuales son combustibles obtenidos a partir de biomasa. Se entiende por biomasa como toda la materia orgánica que forma o formó parte de los seres vivos y por lo tanto posee energía química almacenada producto de sus procesos metabólicos.

Los biocombustibles pueden ser aprovechados de la misma manera que los combustibles fósiles convencionales, ya que la energía obtenida de ambos se basa en la oxidación de compuestos que contienen carbono e hidrógeno, entre otros elementos, para obtener dióxido de carbono y agua, principalmente. La diferencia entre los combustibles fósiles convencionales y los biocombustibles estriba en el origen de los mismos. Mientras que los combustibles fósiles se formaron a lo largo de periodos de tiempo comparables a eras geológicas, cuando una cantidad de biomasa quedó atrapada bajo capas de sedimentos y rocas, siendo sometida a grandes presiones y temperaturas para fosilizarse y producir hidrocarburos, los biocombustibles se originan por diversos métodos a partir de biomasa sin fosilizar, la cual se renueva en periodos comparables al tiempo de vida de seres vivos como plantas y animales.

Debido a que el carbono que contienen los combustibles fósiles se encontraba atrapado bajo la superficie terrestre, no era capaz de interactuar con la atmósfera, pero cuando

éstos combustibles fósiles se queman, liberan a la atmósfera carbono que antes no estaba presente, provocando un desequilibrio en los gases presentes en la atmósfera, con todos los efectos conocidos como lo es el cambio climático por efecto invernadero. Por otra parte, aunque la biomasa también contiene carbono, se trata de carbono que fue absorbido recientemente de la atmósfera durante el ciclo de vida de dicha biomasa, el cuál será liberado de regreso a la atmósfera ya sea que se queme como combustible o se descomponga lentamente, por lo que no hay una adición neta al carbono existente en la atmósfera. Por estas razones, se dice que los biocombustibles son neutrales en cuanto a su aporte de carbono a la atmósfera, siendo una de sus ventajas frente a los combustibles fósiles. Otras ventajas son que los biocombustibles contienen menos cantidad de compuestos tóxicos que están presentes en los combustibles fósiles, como azufre y plomo, por lo cual son menos contaminantes que estos, además de que, bajo un apropiado manejo, se consideran recursos renovables y sustentables.

Los tipos de biocombustibles son tan numerosos como numerosos son los tipos de biomasa de los que se pueden obtener, por lo que la investigación se está dedicando a encontrar nuevos y mejores biocombustibles con la esperanza de que puedan desplazar a los combustibles fósiles que no son renovables.

Una de las áreas que se están investigando actualmente es la referente a la gasificación de biomasa, la cual consiste en obtener un gas combustible y otros productos útiles al someter a algún tipo de biomasa a un proceso de pirolisis bajo condiciones controladas, que dependen del tipo de biomasa a tratar y del tipo de productos deseados. Las ventajas que presenta la gasificación de biomasa es que un gas es más fácil de quemar, y por lo tanto más eficiente, que un combustible sólido, además de que se pueden obtener subproductos útiles del proceso.

En el presente trabajo se propone el estudio y análisis del proceso de gasificación aplicado a la biomasa subproducto de la actividad agroindustrial. El estado actual de los combustibles fósiles, en cuanto a su disponibilidad, precios e impacto ambiental, hacen

necesaria la búsqueda de nuevas fuentes energéticas que cumplan con las necesidades energéticas de la industria y sean competitivas de manera sustentable.

1.1. Objetivo General

- Predecir las características del gas de síntesis obtenido de la gasificación de subproductos agrícolas, mediante la modelación y simulación en MATLAB del proceso de gasificación termodinámico y químico.

1.2. Objetivos Específicos

- Entender el proceso de gasificación desde el punto de vista termodinámico y químico, a través del estudio y el análisis de las ecuaciones del modelo que lo gobiernan.
- Desarrollar el código de un programa computacional en MATLAB del modelo, para la simulación del proceso de gasificación de la biomasa.
- Predecir las características del gas de síntesis obtenido a partir de biomasa mediante la implementación del programa desarrollado.
- Validar el modelo mediante una comparación de las propiedades termo-físicas del gas de síntesis obtenido en la simulación con datos y resultados reportados en la literatura técnica.
- Realizar una comparación de las propiedades termo-físicas del gas de síntesis obtenido en la simulación, con las de combustibles tradicionales, como GLP³ o GN⁴.

³ Abreviación para Gas Licuado de Petróleo.

⁴ Abreviación para Gas Natural.

2. Marco teórico

2.1. Biomasa

Para la mayoría de la población mundial, las formas más familiares de energía renovable son las que provienen del sol y del viento. Sin embargo, existen otras fuentes de biomasa, como leña, carbón de leño, cascarilla de arroz, que proveen un alto porcentaje de la energía consumida en el mundo y tienen potencial para suplir mayores volúmenes.

El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz, macadamia), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros). Esta es la fuente de energía renovable más antigua conocida por el ser humano, pues ha sido usada desde que nuestros ancestros descubrieron el secreto del fuego.

Desde la prehistoria, la forma más común de utilizar la energía de la biomasa ha sido por medio de la combustión directa: quemándola en hogueras a cielo abierto, en hornos y cocinas artesanales e, incluso, en calderas; convirtiéndola en calor para suplir las necesidades de calefacción, cocción de alimentos, producción de vapor y generación de electricidad.

Los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de procesos más eficientes y limpios para la conversión de biomasa en energía; transformándola, por ejemplo, en combustibles líquidos o gaseosos, los cuáles son más convenientes y eficientes. Así aparte de la combustión directa, se pueden distinguir otros dos tipos de procesos: el termo-químico y el bio-químico.

Las fuentes más importantes de biomasa son los campos forestales y agrícolas pues en ellos se producen residuos (rastros) que normalmente son dejados en el campo al

consumirse sólo un bajo porcentaje de ellos con fines energéticos. En la agroindustria, los procesos de secado de granos generan subproductos que son usados para generación de calor en sistemas de combustión directa; tal es el caso del bagazo de caña de azúcar, la cascarilla de café y la de arroz. Por otro lado, los centros urbanos generan grandes cantidades de basura compuestas en gran parte, por materia orgánica que puede ser convertida en energía, después de procesarla adecuadamente. (Biomass Users Network (BUN-CA), 2002).

Se considera que la biomasa es una fuente renovable de energía porque su valor proviene del Sol. A través del proceso de fotosíntesis, la clorofila de las plantas captura su energía, y convierte el dióxido de carbono (CO_2) del aire y el agua del suelo en carbohidratos, para formar la materia orgánica. Cuando estos carbohidratos se queman, regresan a su forma de dióxido de carbono y agua, liberando la energía que contienen. De esta forma, la biomasa funciona como una especie de batería que almacena la energía solar. Entonces, se produce en forma sostenida, es decir, en el mismo nivel en que se consume esa batería durará indefinidamente.

Uno de los tipos de biomasa provenientes de la agricultura que últimamente ha tenido buena acogida en países amazónicos de sur américa como lo son el Perú, Brasil y más recientemente Colombia, debido a el surgimiento de su cultivo y respectivo beneficio, es el de la Sacha Inchi la cual es una planta oleaginosa oriunda de la región. Por esta razón en el presente trabajo se plantea como alternativa el uso de este subproducto (cascarilla de Sacha Inchi) en el proceso de gasificación, para su análisis y evaluación de factibilidad dentro del proceso productivo completo del fruto.

Para evaluar la factibilidad técnica y económica de un proceso de conversión de biomasa en energía, es necesario considerar ciertos parámetros y condiciones que la caracterizan. Estos que se explican a continuación, determinan el proceso de conversión más adecuado y permiten realizar proyecciones de los beneficios económicos y ambientales esperados.

2.2. La sachá Inchi y su beneficio

La parte que se aprovecha del sachá Inchi es su fruto, su semilla. La mayor cualidad de esta semilla, además de buenos contenidos proteicos, baja cantidad de ácidos grasos saturados y alta de insaturados (Omega 6 y 9); es su elevado contenido de Omega 3. Esta característica, escasa en los mercados, hace de los productos derivados de este sean de un elevado valor comercial, pues el consumidor está dispuesto a pagar un alto precio para obtener un alimento de calidad. En este punto es importante realizar una aclaración sobre los omegas. Estos son un tipo de grasa poliinsaturada esencial, es decir, que el organismo no los produce y los necesita para su correcto funcionamiento. Los omegas 6 y 9 son esenciales, pero el ser humano los puede encontrar en una gran cantidad de alimentos que componen su dieta; es decir, son importantes, pero los encontramos en abundancia en los alimentos. Por su parte, el omega 3 también es fundamental para el correcto funcionamiento del organismo, pero este es mucho más escaso. Las formas más comunes conocidas son los aceites de pescado, que tienen unas características organolépticas no muy agradables. También se encuentra en algunas plantas como la oliva, nueces, soya, linaza, entre otras (Manco, 2006, pág. 3).

Figura 2-1 Fruto y hojas de sachá Inchi. (Gulteros, 2014)



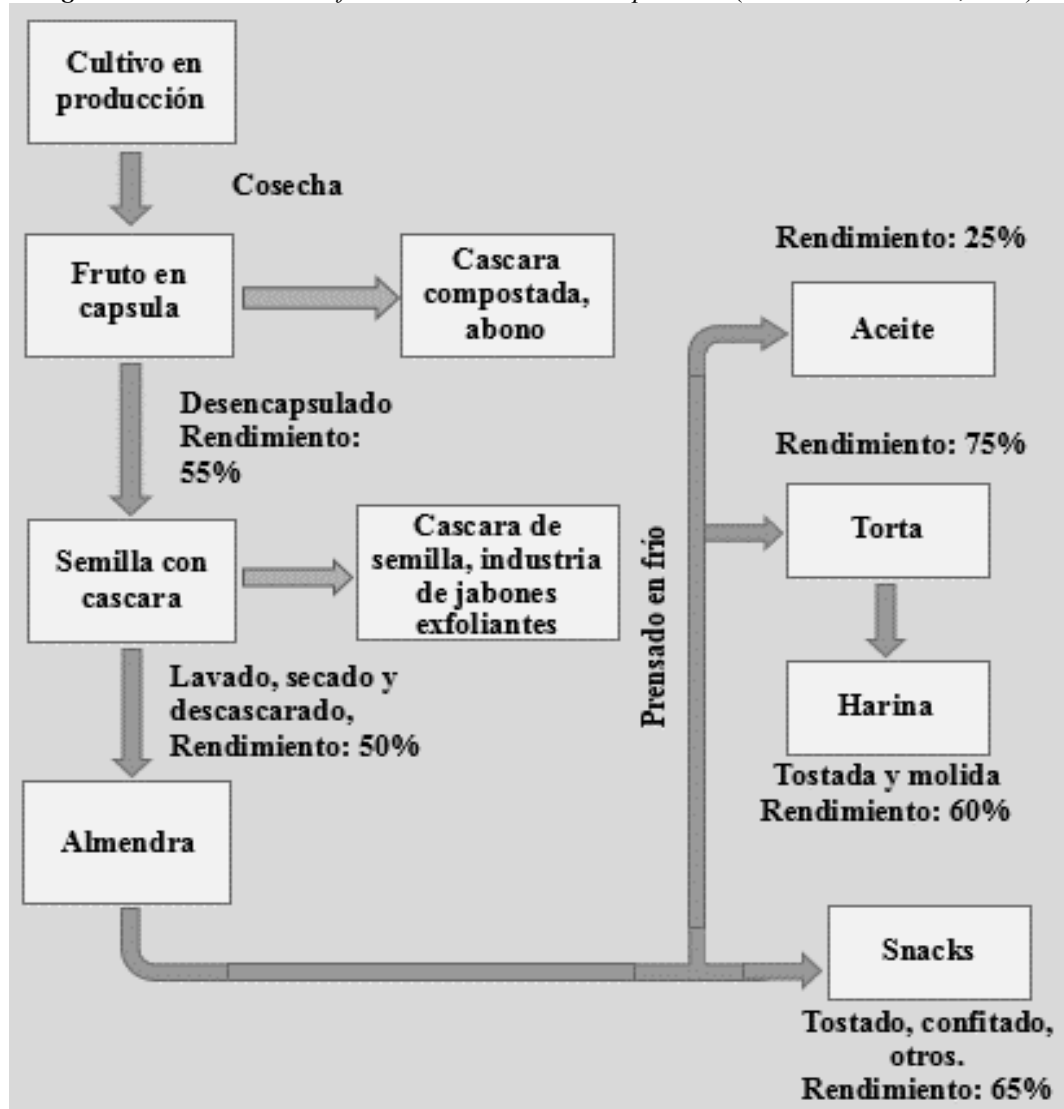
El omega 3 es tanpreciado porque estimula la formación de membranas celulares, de hormonas, de la retina, permite además el correcto funcionamiento del sistema inmunológico y el funcionamiento de las neurotransmisiones químicas (es decir desarrollo cognitivo, un aspecto a tener en cuenta en la producción y comercialización, pues países como Japón, Estados Unidos de América y algunos de la Unión Europea, se han dado cuenta de esto y están tratando de apuntar buena parte de productos con alto contenido de omega 3 a sus niños, etapa en la que el ser humano desarrolla la mayoría de las funciones cerebrales); también evita que se formen otros compuestos en el organismo que incrementan la coagulación de la sangre, evitando así el sobredesgaste de las arterias y evitando posibles arritmias cardiacas. A su vez, disminuye los valores de triglicéridos en la sangre (Comercial office of Perú in taipei, s.f.). También permite que la sangre circule más libremente por las venas, es decir, que no se formen capas grasosas en los conductos vasculares que puedan terminar en taponamiento de arterias; es decir, es ideal para prevenir enfermedades de tipo cardiovascular (CHIRINOS, 2009).

Por lo anterior es que el Sacha Inchi posee un gran mercado que aprovechar. Actualmente es bajo el nivel de industrialización ya que como se ha dicho anteriormente es un cultivo que ya echó sus raíces y apenas está empezando a crecer lentamente. Igualmente, existen distintos productos obtenidos a partir de él. El primero es el sachá Inchi tostado, con un grado de industrialización bajo. Consiste simplemente en empacar el fruto una vez ha sido recolectado, descascarado y tostado bajo ciertas condiciones. Según algunos entendidos, de esta manera directa, se aprovechan mejor las propiedades alimenticias y suplementarias como vitaminas y omegas. Ya que no se han alterado las condiciones normales de estos.

El más popular tal vez es el aceite de sachá Inchi. El cual se extrae mediante un proceso de prensado en frío. Se debe realizar en frío ya que si se aplican procesos en los que intervengan altas temperaturas se afectarán las características funcionales elementales. Se ha visto que este aceite puede ser utilizado como aceite de mesa y de cocina; aunque no es muy recomendable lo último, ya que como se dijo anteriormente los procesos térmicos alteran las propiedades de los grupos omega. En tercer lugar, similar al primero se comercializa en

forma de “snack”, difiere del primero en que en este proceso se le agregan otros elementos para que tenga un sabor o una presentación diferente más atractivo para el público, pero que no altera sus características. En la figura 2-2, podemos observar gráficamente como sería el proceso de beneficio de la semilla con sus diferentes subproductos obtenidos al final.

Figura 2-2 Proceso de beneficio de la sachá Inchi. Adaptada de (Reforesta Perú SAC, 2009)



Yendo más allá, también se puede producir harina y mantequilla de Sacha Inchi, pero a la fecha no se han comercializado en el país; aunque en Perú someramente ya se ha iniciado la incursión en el mercado de este par de presentaciones.

2.1.1 Sitios y ciudades del país donde se elabora industrialmente

Actualmente existen tres industrializadores a “gran” escala de este cultivo. El primero y tal vez más grande debido a que lleva un mayor tiempo funcionando es la empresa “Agroindustrias Sacha Inchi” ubicada en La Dorada, Putumayo; la cual cobija más de 150 familias campesinas productoras y tiene un alto impacto en la economía de la región pues es una buena fuente de trabajo; es decir, es un ejemplo claro de desarrollo económico de la mano con desarrollo social, ya las familias campesinas no están dedicándose al cultivo de la coca sino que ahora si tienen un verdadero cultivo que los identifique y que cuenta con potencial para explotar, además de los empleos generados en la fábrica como transportadores, seleccionadores, jefes de laboratorio, directores comerciales, asistentes técnicos, en fin, tratan de que toda la población obtenga beneficios de allí. Un excelente y claro ejemplo a seguir. Comercializan su producto principalmente al Valle del Cauca, Huila y Cundinamarca.

Otra es Omega Oils de Colombia⁵, ubicada en Antioquia. Con locación de su centro de acopio y procesamiento en el municipio de San Jerónimo.

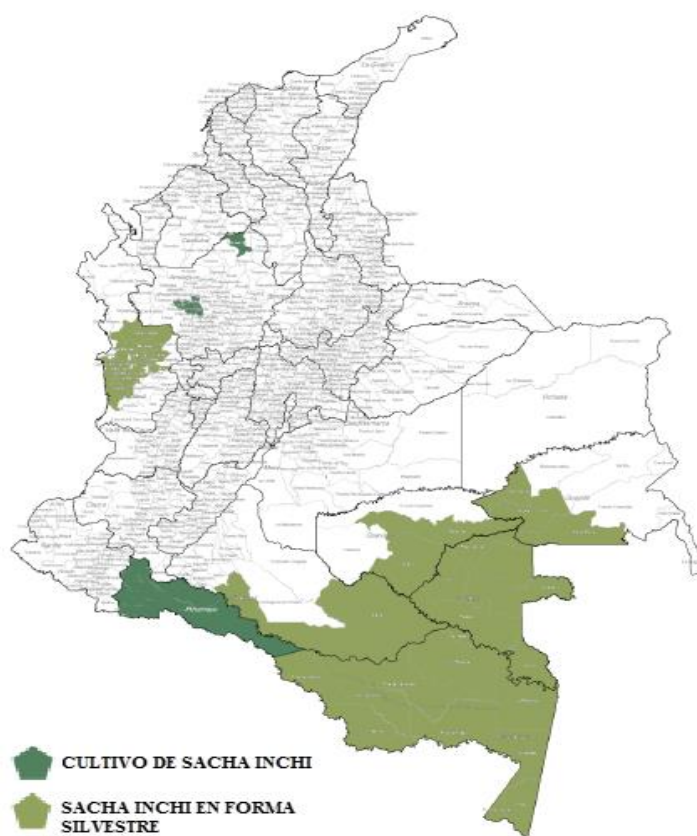
El departamento pionero en esta cuestión en Colombia es Putumayo, en el que el cultivo está un poco más expandido y conocido, en este departamento se tienen siembras de medianos productores que venden el producto a las cooperativas ubicadas en los municipios del departamento, y existe un centro de acopio denominado “Agroindustrias Sacha Inchi” que tiene ya cuatro años de funcionamiento y que recoge más de 150 familias campesinas y dos resguardos indígenas; seguido por la región de la Orinoquia en la que se encuentra en

⁵ OMEGA OILS DE COLOMBIA S.A.S; Cl 5 C 36 B-50 Interior 503, Medellín – Colombia.

estado silvestre, en donde también se están empezando a domesticar y dar los primeros pasos para la adopción del cultivo.

Antioquia es un departamento relativamente nuevo en esto, pero que ha entrado fuerte en esta materia, debido a su correcta planificación y proyección de mercados. En el departamento de Antioquia se está desarrollando y cuenta con aproximadamente 10-15 productores ya establecidos en el occidente del departamento (Sopetrán, Santa Fe de Antioquia y San Jerónimo) tierras que por su composición y características climatológicas han resultado óptimas para el desarrollo de estos cultivos. El cultivo ha entrado fuerte ya que una de las principales empresas transformadoras y comercializadoras del sacha Inchi en el país es de la región: Omega Oils de Colombia. En el Chocó se encuentra en estado silvestre en menor medida.

Figura 2-3 Presencia de sacha Inchi en el territorio colombiano (Valencia, 2011, pág. 14).



Se destacan en colores más fuertes el departamento de Putumayo, occidente antioqueño y Cauca; se resaltan también zonas de la Amazonía, Orinoquía y el Chocó donde hay en forma silvestre.

2.2.1. Tipo de biomasa:

Los recursos biomásicos se presentan en diferentes estados físicos que determinan la factibilidad técnica y económica de los procesos de conversión energética que pueden aplicarse a cada tipo en particular. Por ejemplo, los desechos forestales indican el uso de los procesos de combustión directa o procesos termo- químicos; los residuos animales indican el uso de procesos anaeróbicos (bioquímicos), etc.

El estado físico de la biomasa puede clasificarse según el tipo de recurso, como se indica en la Tabla 2-2:

Tabla 2-1 Tipos de biomasa. (Biomass Users Network (BUN-CA), 2002)

Recurso de biomasa	Tipo de residuo	Características físicas
Residuos forestales	Restos de aserrío: corteza, aserrín, astillas.	Polvo, sólido, HR > 50%
	Restos de ebanistería: aserrín, trozos, astillas.	Polvo, sólido, HR 30% - 45%
	Restos de plantaciones: ramas, corteza, raíces.	Sólido, HR > 55%
Residuos agropecuarios	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales.	Sólido, alto contenido de humedad
	Cáscara y polvo de granos secos.	Polvo, HR < 25%
	Estiércol.	Sólido, alto contenido de humedad
	Residuos de cosechas: tallos, hojas, maleza.	Sólido, HR > 55%

Residuos industriales	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales.	Sólido, humedad moderada
	Residuo de procesamiento de carnes.	Sólido, alto contenido de humedad
	Aguas de lavado y pre cocido de carnes y	Líquido
	Grasas y aceites vegetales.	Líquido graso
Residuos urbanos	Aguas negras.	Líquido
	Desechos domésticos orgánicos (vegetales).	Sólido, alto contenido de humedad.
	Basura orgánica (madera).	Sólido, alto contenido de humedad

- *Composición química y física:* Las características químicas y físicas de la biomasa determinan el tipo de combustible o subproducto energético que se puede generar; por ejemplo, los desechos animales producen altas cantidades de metano, mientras que la madera puede producir el denominado “gas pobre”, que es una mezcla rica en monóxido de carbono (CO). Por otro lado, las características físicas influyen en el tratamiento previo que sea necesario aplicar.
- *Contenido de humedad (H.R.):* El contenido de humedad de la biomasa es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%. Muchas veces, los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad muy superior, que obliga a implementar operaciones de acondicionamiento, antes de ingresar al proceso de conversión de energía.
- *Porcentaje de cenizas:* El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. En los procesos que incluyen la combustión de la biomasa, es importante conocer el porcentaje de generación de

ceniza y su composición, pues, en algunos casos, ésta puede ser utilizada; por ejemplo, la ceniza de la cascarilla de arroz es un excelente aditivo en la mezcla de concreto o para la fabricación de filtros de carbón activado.

- *Poder calórico*: El contenido calórico por unidad de masa es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa. Su poder calórico está relacionado directamente con su contenido de humedad. Un elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia de la combustión debido a que una gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material.
- *Densidad aparente*: Esta se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que presenta, bajo condiciones dadas. Combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requiriéndose menores tamaños de los equipos y aumentando los períodos entre cargas. Por otro lado, materiales con baja densidad aparente necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte y, algunas veces, presentan problemas para fluir por gravedad, lo cual complica el proceso de combustión, y eleva los costos del proceso.
- *Recolección, transporte y manejo*: Las condiciones para la recolección, el transporte y el manejo en planta de la biomasa son factores determinantes en la estructura de costos de inversión y operación en todo proceso de conversión energética. La ubicación del material con respecto a la planta de procesamiento y la distancia hasta el punto de utilización de la energía convertida, deben analizarse detalladamente para lograr un nivel de operación del sistema por encima del punto de equilibrio, con relación al proceso convencional. (Biomass Users Network (BUN-CA), 2002).

En la superficie de nuestro planeta alrededor de 155 mil millones de toneladas de materia orgánica son producidas mediante el proceso fotosintético, cada año. Sin embargo, solamente una porción de esta materia orgánica es directamente comestible por el hombre y por los animales, la mayoría de ella, tomando diversas formas, no es comestible y en muchos casos

se convierte en una gran fuente de contaminación ambiental. (Biomass Users Network (BUN-CA), 2002).

Las pocas alternativas, desde el punto de vista económico, social y nutricional, que en la actualidad se presentan para el aprovechamiento de los residuos agroindustriales, aunado a la falta de conciencia en la protección del medio ambiente provocan que estos sean mal manejados y se conviertan en fuentes de contaminación de los recursos naturales (suelo, agua y aire).

Si analizamos los residuos que se producen en las diferentes agroindustrias, encontramos, por ejemplo, que en la industria del fique se utiliza solamente el 2% de la biomasa producida, en la industria de la cerveza solamente el 8% de los nutrientes del grano, y en las industrias del aceite de palma y de la celulosa se utiliza menos del 9% y 30%, respectivamente, de la biomasa producida.

2.3. Combustión y combustibles

Cualquier material que pueda ser quemado para liberar energía es llamado combustible, y una reacción química en la cual un combustible se oxida y se libera una gran cantidad de energía se conoce como combustión. El oxidante más frecuentemente empleado en procesos de combustión es el aire. El aire seco contiene aproximadamente 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno atmosférico, en base molar. Por lo tanto:

$$1 \text{ kmol } O_2 + 3,76 \text{ kmol } N_2 = 4.76 \text{ kmol Aire} \quad (2-1)$$

Durante un proceso de combustión, los componentes que existen antes de la reacción, son llamados reactantes, y los componentes que existen después de la reacción, son llamados productos. Las ecuaciones químicas son balanceadas con base en el principio de conservación de la masa, el cual establece que la masa total de cada elemento se conserva durante la

reacción química. La relación de la masa de aire a la masa de combustible durante el proceso de combustión, es llamada la relación de aire – combustible, o “air – fuel” AF:

$$AF = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} \quad (2-2)$$

Un proceso de combustión está completo si todo el carbón en el combustible se quema a CO₂, todo el hidrógeno se quema a H₂O y todo el azufre (si existe) se quema a SO₂. La mínima cantidad de aire necesaria para la combustión completa del combustible se llama aire teórico o estequiométrico. El aire teórico también es llamado cantidad químicamente correcta de aire o 100% de aire teórico. El proceso de combustión ideal durante el cual un combustible es quemado completamente con aire teórico se conoce como combustión estequiométrica o teórica de dicho combustible. La cantidad de aire en exceso de la cantidad estequiométrica se conoce como exceso de aire. La cantidad de exceso de aire se expresa normalmente en términos del aire estequiométrico como porcentaje de exceso de aire o porcentaje de aire teórico.

Durante una reacción química, algunos enlaces químicos se rompen, mientras que otros se forman. Por lo tanto, un proceso que envuelve reacciones químicas también involucra cambios en energías. Debido al cambio en composición, es necesario tener un estado de referencia estándar para todas las sustancias, el cual se eligió como 25°C y una atmósfera de presión (101.325 kPa). La diferencia entre la entalpía de los productos en un estado específico y la entalpía de los reactantes en el mismo estado para una reacción completa se conoce como entalpía de reacción **h_R**. Para procesos de combustión, la entalpía de reacción es usualmente referida como entalpía de combustión **h_C**, la cual representa la cantidad de energía liberada durante un proceso de combustión en flujo estacionario cuando 1 kmol o kg de combustible se quema completamente a una temperatura y presión específicas. La entalpía de una sustancia en un estado específico debida a su composición química, es llamada entalpía de formación **h_F**. La entalpía de formación de todos los elementos estables se fija con un valor de cero en el estado de referencia estándar de 25°C y 1 atm.

El poder calorífico de un combustible es definido como la cantidad de calor liberado cuando el combustible se quema completamente en un proceso de combustión de flujo estacionario y los productos son retornados al estado de referencia estándar de 25°C y 1 atm. El poder calorífico de un combustible es igual al valor absoluto de la entalpía de combustión del mismo. En ausencia de cualquier pérdida de calor al medio ambiente, la temperatura de los productos alcanzará un máximo, el cual se conoce como la temperatura de llama adiabática de la reacción. La temperatura de llama adiabática se calcula al hacer la entalpía de los productos igual a la entalpía de los reactivos, y resolver el conjunto de ecuaciones resultantes (Çengel, 2006).

(Amell Arrieta, 2007), en su libro “Manejo de combustibles”, hacen una revisión exhaustiva de conceptos y definiciones referentes a la combustión y a los combustibles. En ésta sección, se presenta un condensado de la teoría principal sobre el tema.

En el desarrollo científico y tecnológico de la combustión, la mayor preocupación se ha centrado en la disponibilidad, calidad y tratamiento de los combustibles; ya que el comburente se considera que está disponible en el aire. Sin embargo, la disponibilidad y calidad del oxígeno para la combustión, incide en la ocurrencia óptima y segura de ésta. Si se considera el aire seco, por cada mol de O_2 existen 4.76 moles de aire, con la presencia de otros compuestos que alteren esta composición.

La presencia de un combustible y el comburente, no es condición suficiente para que la combustión se inicie, sostenga y propague. Para ello se requieren otras condiciones complementarias para su ocurrencia, las cuales están asociadas con propiedades físicas y químicas de la mezcla combustible y comburente. Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, la combustión de un combustible ocurre de manera sostenida cuando se den simultáneamente las siguientes condiciones:

- Que estén presente combustible y comburente (oxígeno) en proporciones adecuadas, ello está relacionado con que la mezcla combustible – comburente debe encontrarse en su respectivo intervalo de inflamabilidad. Adicionalmente, se requiere que exista un contacto óptimo entre las moléculas de combustible y comburente.
- Que la mezcla combustible y comburente se energice hasta alcanzar su temperatura de ignición o que el aire de combustión se encuentre a la temperatura de autoignición del combustible. Estas condiciones están asociadas con tres propiedades características de una mezcla combustible – comburentes como son: La energía, la temperatura de ignición y la temperatura de autoignición.

Como puede observarse, la ocurrencia y propagación de la combustión dependerá de si se tienen condiciones coincidentes con tres propiedades de combustión: Intervalos de inflamabilidad, energía de ignición, temperatura de ignición y temperatura de auto ignición, las cuales se estudiarán más adelante.

2.3.1. Propiedades de los combustibles

Para el manejo de los combustibles, es necesario conocer datos como la disponibilidad energética por cantidad de combustible, las condiciones para que ocurra la combustión, los requerimientos de aire para tener una combustión completa y la cantidad y composición de productos de combustión. Estos requerimientos pueden ser fácilmente obtenidos cuando se conocen las propiedades de combustión de la mezcla combustible – comburente utilizada, de ahí la importancia de este tema en la ingeniería de combustión.

- *Volumen estequiométrico de aire (V_a):* Es el volumen normal o estándar de aire requerido para quemar estequiométricamente un m^3 de combustible, se expresa en m^3 de aire / m^3 de combustible.

- *Volumen de dióxido de carbono (V_{CO_2}):* Es el volumen de dióxido de carbono normal o estándar, producido por la combustión estequiométrica de un m^3 de combustible, se expresa en $m^3 CO_2 / m^3$ combustible.
- *Volumen de agua (V_{H_2O}):* Es el volumen de vapor de agua normal o estándar producido por la combustión estequiométrica de un m^3 de combustible, se expresa en $m^3 H_2O/m^3$ combustible.
- *Volumen de humos secos o poder fumígeno seco (V_{fs}):* Es el volumen de humos secos normal o estándar producido por la combustión estequiométrica de un m^3 de combustible, se expresa en m^3 humos secos / m^3 combustible.
- *Volumen de humos húmedos o poder fumígeno húmedo (V_{fh}):* Es el volumen de humos húmedos normal o estándar producido por la combustión estequiométrica de un m^3 de combustible, se expresa en m^3 humos húmedos / m^3 combustible.
- *Porcentaje máximo de CO_2 :* Es la relación entre el volumen de CO_2 y el volumen de humos secos en porcentaje, en condiciones de combustión estequiométrica este valor es máximo.
- *Límite inferior de inflamabilidad (L.I.I):* Es la relación mínima en porcentaje entre el volumen de combustible y el volumen de la mezcla combustible - aire, para la cual esta mezcla es inflamable, por debajo de este valor no existe propagación de la llama en presencia de una fuente de ignición.
- *Límite superior de inflamabilidad (L.S.I):* Es la relación máxima en porcentaje entre el volumen de combustible y el volumen de la mezcla combustible – aire, para la cual esta mezcla es inflamable, por encima de este valor no existe propagación de la llama en presencia de una fuente de ignición. Los límites de inflamabilidad dependen de la composición del combustible, presencia de inertes, temperatura y presión de la

mezcla combustible – oxidante y de la geometría del recinto donde ocurre la combustión. Un aumento de la temperatura produce una disminución en el LII y una elevación en el LSI, es decir, se amplía el intervalo explosivo; el efecto del aumento de presión es similar al de la temperatura; la presencia de inertes (CO_2 , N_2) estrecha el intervalo explosivo debido al aumento del LII y disminución del LSI.

- *Temperatura de ignición (T_{ig}):* Es la temperatura mínima que debe alcanzar la mezcla combustible – aire para que se inicie la combustión, se sostenga y auto propague, esta propiedad se determina experimentalmente y depende de factores como la composición química, la presión de la mezcla y la presencia de sensibilizadores e inhibidores.
- *Temperatura de auto ignición (T_{ai}):* Es la temperatura a la cual debe encontrarse la mezcla combustible - aire, para que, sin la necesidad de una fuente de ignición la combustión se inicie y auto sostenga. Esta temperatura se determina experimentalmente.
- *Poder calorífico(PC):* Es la propiedad de combustión que informa acerca de la energía disponible por cantidad de combustible, por lo que resulta de interés en las transacciones comerciales, en los sistemas de transporte y distribución y en la especificación de las tecnologías de conversión energética.
- *Poder calorífico superior (PC_s):* Se define como la cantidad de energía liberada durante la combustión estequiométrica de un combustible tipo hidrocarburo (HC) en la que el agua de los productos de combustión se encuentra en fase líquida.
- *Poder calorífico inferior (PC_l):* Se define como la cantidad de energía liberada durante la combustión estequiométrica de un combustible tipo hidrocarburo (HC) en la que el agua de los productos de combustión se encuentra como vapor.

La diferencia entre el poder calorífico superior e inferior es el calor latente de vaporización del agua: $(PC_S - PC_I) = \text{“calor latente de vaporización del agua”}$.

En los sistemas de combustión convencional donde no se implementan sistemas de condensación para recuperar el calor latente de vaporización del agua, las pérdidas de energía son del orden de 10%, 5% y 3% cuando se usen como combustibles gases con contenido de hidrógeno y carbono, hidrocarburos líquidos y carbón, respectivamente.

- *Temperatura de llama adiabática:* Es la temperatura que alcanzan los productos de combustión cuando ésta se realiza en condiciones adiabáticas, si bien esta temperatura nunca se alcanza en una combustión real, es una propiedad importante para el estudio de fenómenos térmicos. La temperatura de llama adiabática es máxima cuando la combustión es estequiométrica, y disminuye con el defecto y exceso de aire.
- *Temperatura de rocío (T_R):* Es la temperatura a la cual se inicia la condensación del vapor de agua presente en los productos de combustión, cuando el combustible contiene hidrógeno. El conocimiento de esta propiedad es necesario para evitar la condensación en los ductos de evacuación de humo y para el diseño de sistema de combustión con recuperación de calor por condensación parcial o total del vapor. La temperatura de rocío es máxima para combustión estequiométrica y se disminuye con el exceso de aire.
- *Temperatura de rocío ácida:* Cuando un combustible contiene azufre, su combustión con el oxígeno forma dióxido de azufre, este compuesto aumenta la temperatura de rocío. Por lo anterior, para combustibles con contenido de azufre tiene sentido definir esta temperatura. Para los aceites liviano (Fuel Oil 2) y pesado (Fuel Oil 6), la temperatura es de aproximadamente 143°C y 160°C, respectivamente.
- *Punto de inflamación:* Mínima temperatura a la cual el vapor de un aceite produce una llama, que se extingue inmediatamente, al ser expuesto a una pequeña llama

estándar. Es una medida de la tendencia de la muestra a formar una mezcla inflamable con el aire. Es utilizado para temas de seguridad y en regulaciones de transporte. Puede dar una idea de la peligrosidad del compuesto en situaciones extremas de temperatura y presión. El punto de inflamación puede indicar la posible presencia de compuestos volátiles e inflamables en un compuesto relativamente no volátil o inflamable, indicando la presencia de contaminantes como gasolinas.

- *Factor de equivalencia ER*: Expresa la relación entre C/A real másica o volumétrica y la relación C/A estequiométrica:

$$ER = \frac{C/A_{est}}{C/A_{act}} \quad (2-3)$$

2.3.2. Tipos de combustión

Para quemar una cantidad unitaria de combustible se necesita un volumen teórico de aire, V_a , para obtener una combustión neutra o estequiométrica. El aire y el combustible tienen un movimiento rápido y su contacto se produce en un período muy corto; la mezcla gas-aire no es siempre homogénea ya que en muchos casos el aire admitido no se utiliza en su totalidad, bien sea por falta o por exceso. Por esta razón se han definido varios tipos de combustión dependiendo del volumen de aire realmente empleado.

- *Combustión estequiométrica*: Se consigue cuando el aire y el combustible reaccionan en cantidades teóricas dadas por las reacciones balanceadas. En este caso, la proporción de aire n es igual a uno y los productos no contienen oxígeno libre ni elementos inquemados, presentándose el máximo volumen de CO_2 .

- *Combustión completa con exceso de aire:* En este caso se utiliza un volumen de aire mayor al teórico. El exceso no toma parte en la reacción y se encuentra en los productos, absorbiendo parte del calor que se genera. Como en los productos se encuentra oxígeno, la combustión también se denomina oxidante.
- *Combustión incompleta con deficiencia de aire:* Se presenta cuando el aire utilizado es menor que el teórico y todo el oxígeno se consume en el proceso. El combustible no es completamente oxidado y en los productos de la reacción se encuentran, además del CO_2 y el vapor de agua, monóxido de carbono e hidrógeno, productos de una reacción incompleta. Debido a la presencia de elementos reductores en los productos (CO , H_2), esta combustión se denomina también reductora.
- *Combustión incompleta con mezcla deficiente:* Esta combustión es obtenida cuando en los humos se encuentran productos de una combustión completa (CO_2 , H_2O), gases combustibles y oxígeno. La situación puede presentarse cuando al tenerse temperatura bastante elevada en la zona de reacción, mayores de 1600°C , ocurre disociación de los productos iniciales. En el caso más general, esto puede suceder porque se realice localmente una combustión incompleta por mezcla no homogénea, por temperatura insuficiente o por un enfriamiento brusco. Se suelen considerar los productos de esta combustión como la suma de los productos de una combustión incompleta con deficiencia de aire, más aire adicional sin usar. En la mayor parte de los casos, el aire admitido no se utiliza en su totalidad en el proceso (Amell Arrieta, 2007).

2.4. Gasificación de Biomasa

Prabir Basu, en el 2008, publica el libro “*Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*” en el cual expone la historia, usos, teoría, diseños y aplicaciones de éste

proceso. En ésta sección se presenta un resumen del capítulo de dicho libro que explica la teoría del proceso de gasificación. (Basu, 2013).

Gasificación es la conversión de material prima sólida o líquida en otra más conveniente y útil materia prima gaseosa que puede quemarse para liberar energía o usarse para producir otros químicos de valor añadido. La gasificación y la combustión son 2 procesos termoquímicos muy estrechamente relacionados, pero hay una diferencia importante entre ellos. La gasificación empaca energía en forma de enlaces químicos en el gas producido, mientras que la combustión rompe esos enlaces para liberar la energía. El proceso de gasificación añade hidrógeno y arranca carbono a la materia prima para producir gases con una mayor relación hidrógeno a carbono, mientras que la combustión oxida al hidrógeno y al carbono en agua y dióxido de carbono, respectivamente.

Un proceso típico de gasificación de biomasa puede incluir los siguientes pasos:

- Secado
- Descomposición térmica o pirólisis
- Combustión parcial de ciertos gases, vapores y carbón
- Gasificación de los productos de descomposición

La pirólisis es un proceso de descomposición térmica que parcialmente remueve carbono de la materia prima, pero no añade hidrógeno. Por otra parte, la gasificación requiere un medio gasificante como vapor de agua, aire u oxígeno para reacomodar la estructura molecular de la materia prima para así convertirla de sólidos a gases o líquidos, y también puede añadir hidrógeno al producto. El uso de un medio es esencial para el proceso de gasificación.

2.4.1. Medios gasificantes

Los agentes gasificantes reaccionan con el carbón sólido e hidrocarburos más pesados para convertirlos en gases de bajo peso molecular como CO y H₂. Los principales agentes gasificantes usados son:

- Oxígeno
- Vapor de agua
- Aire

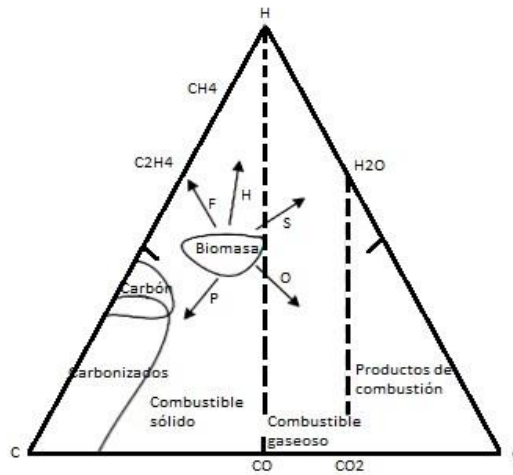
El oxígeno es un agente gasificante popular, aun cuando es principalmente utilizado para la etapa de combustión. Puede ser suministrado a un gasificador bien en su forma pura o mezclado en el aire. El poder calorífico y la composición del gas producido en un gasificador son fuertes funciones de la naturaleza y cantidad del agente gasificante usado.

Tabla 2-2 Rango de poder calorífico del gas producido, de acuerdo al medio gasificante (Basu, 2013).

Medio gasificante	Poder calorífico MJ/Nm ³
Aire	4 - 7
Vapor de agua	10 - 18
Oxígeno	12 - 28

Un diagrama ternario del carbón, hidrógeno y oxígeno, figura 2-4, demuestra las rutas de conversión para la formación de diferentes productos en un gasificador.

Figura 2-4 Diagrama C-H-O para el proceso de gasificación, C carbono, H hidrógeno, O oxígeno, S vapor (“steam”), P pirólisis lenta, F pirólisis rápida (“Fast”). (Basu, 2013).

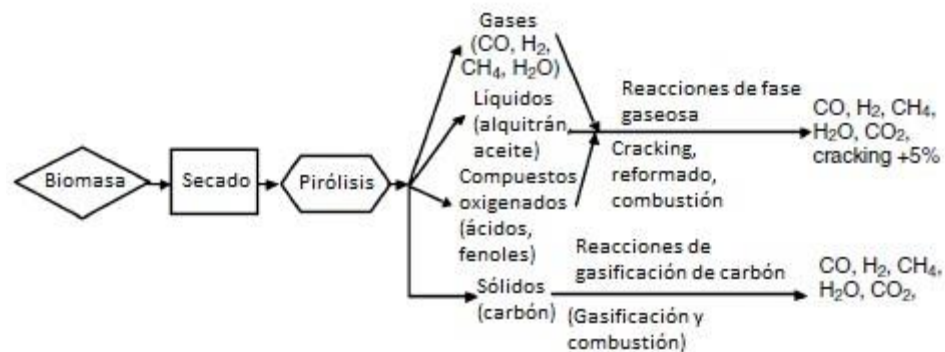


Si el oxígeno es usado como agente gasificante, la ruta de conversión se mueve hacia la esquina del oxígeno. Sus productos incluyen CO para bajas concentraciones de oxígeno y CO₂ para altas concentraciones de oxígeno. Cuando la cantidad de oxígeno excede una cierta cantidad (estequiométrica), el proceso se mueve de la zona de gasificación hacia la zona de combustión, y el gas producido entonces es gas exhausto y no gas combustible. Los gases exhaustos producto de la combustión no contienen poder calorífico una vez enfriados. Cuando el proceso se mueve hacia la esquina del oxígeno, se produce una disminución en el contenido de hidrógeno y un aumento en el contenido de compuestos del carbono como CO y CO₂ en el gas producido. Si se usa vapor como medio gasificante, la ruta de conversión se desplaza hacia la esquina del hidrógeno. Entonces, el gas producido contendrá más hidrógeno por unidad de carbono, resultando en una mayor razón H/C. Algunos de los productos intermedios de reacción como CO y H₂ también ayudan a gasificar el carbón sólido. Si se usa aire en lugar de oxígeno, el nitrógeno en él diluirá fuertemente el gas producido.

2.4.2. El proceso de gasificación

Un proceso de gasificación típico generalmente sigue la secuencia de pasos que se enlistan en la Figura 2-5.

Figura 2-5 Rutas potenciales de gasificación (Basu, 2013).



- Precalentado y secado
- Pirólisis
- Gasificación de carbonizados
- Combustión

Aunque estos pasos frecuentemente son modelados como un proceso en serie, no existe un límite definido entre ellos, y frecuentemente se superponen entre ellos.

En un proceso típico, la biomasa primero se calienta y se seca, para después atravesar un proceso de degradación térmica o pirólisis. Los productos de la pirólisis (líquidos, sólidos y gaseosos), reaccionan entre ellos y con el agente gasificante para formar el producto de gasificación final. En la mayoría de los diseños de gasificadores comerciales, la energía térmica necesaria para el calentamiento, secado, pirólisis y reacciones endotérmicas, viene de una cierta cantidad de reacciones de combustión exotérmicas que se permiten dentro del gasificador.

La Tabla 2-4 enlista algunas de las reacciones químicas más importantes que tienen lugar en un gasificador.

Tabla 2-3 Reacciones típicas de gasificación a 25°C (Basu, 2013).

Tipo de reacción	Reacción
Reacciones del Carbono (C)	
R 1 (Boudouard)	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO + 172 \text{ kJ/mol}$
R 2 (agua-gas o vapor)	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 + 131 \text{ kJ/mol}$
R 3 (hidrogasificación)	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4 - 74.8 \text{ kJ/mol}$
R 4	$C + 0.5 O_2 \rightarrow CO - 111 \text{ kJ/mol}$
Reacciones de Oxidación (O)	
R 5	$C + O_2 \rightarrow CO_2 - 394 \text{ kJ/mol}$
R 6	$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2 - 284 \text{ kJ/mol}$
R 7	$CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2H_2O - 803 \text{ kJ/mol}$
R 8	$H_2 + 0.5 O_2 \rightarrow H_2O - 242 \text{ kJ/mol}$
Reacción de Cambio	
R 9	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 - 41.2 \text{ kJ/mol}$
Reacciones de Metanación (CH₄)	
R 10	$2CO + 2H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2 - 247 \text{ kJ/mol}$
R 11	$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O - 206 \text{ kJ/mol}$
R 12	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O - 165 \text{ kJ/mol}$
Reacciones de Reformado de vapor (H₂O)	
R 13	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2 + 206 \text{ kJ/mol}$
R 14	$CH_4 + 0.5 O_2 \rightarrow CO + 2H_2 - 36 \text{ kJ/mol}$

2.4.2.1. Precalentado y secado

El contenido típico de humedad de la madera recién cortada oscila entre 30% y 60%, y para algunas biomásas puede exceder el 90%. Cada kilogramo de humedad en la biomasa usa por lo menos 2260 kJ de energía extra del gasificador para vaporizar el agua, y esta energía no se recupera. Para altos niveles de humedad, esta pérdida es una preocupación, especialmente

en aplicaciones energéticas. Mientras no puede hacerse mucho sobre la humedad inherente que reside dentro de la estructura de las células, se hacen esfuerzos para eliminar la humedad externa o de superficie. Se necesita un presecado para remover la mayor cantidad de humedad posible de la biomasa antes de alimentarla al gasificador. Para la producción de un gas combustible con un poder calorífico razonablemente alto, la mayoría de los sistemas de gasificación usa biomasa seca con un contenido de humedad de 10% a 20%. El secado final tiene lugar después de que la biomasa entra al gasificador, donde recibe calor de la zona caliente del sistema. Éste calor seca la biomasa, la cual libera el agua remanente. Por arriba de los 100°C, el agua pobremente enlazada que aún se encuentra dentro de la biomasa, es removida irreversiblemente. Mientras la temperatura se eleva, los extractos de bajo peso molecular comienzan a volatilizarse. Éste proceso continúa hasta que se alcanza una temperatura aproximada de 200°C.

2.4.2.2. Pirólisis

En la pirólisis ningún agente externo es añadido. En un proceso de pirólisis lenta, el producto sólido se mueve hacia la esquina del carbono en el diagrama ternario de la Figura 2-4, y se obtiene una mayor cantidad de carbonizados. En la pirólisis rápida, el proceso se mueve hacia el eje C-H opuesto a la esquina del oxígeno. El oxígeno se ve disminuido en gran medida, y por lo mismo, se espera una mayor cantidad de hidrocarburos líquidos. La pirólisis, que precede a la gasificación, consiste en el rompimiento térmico de moléculas grandes de hidrocarburos en otras más pequeñas, sólidas, líquidas y gaseosas condensables y no condensables sin una reacción química importante con el aire, vapor o cualquier otro medio gasificante. Un producto importante de la pirólisis, es el alquitrán formado por la condensación de los vapores condensables producidos en el proceso.

2.4.2.3. Reacciones de gasificación de los carbonizados

La etapa de gasificación que sigue a la pirólisis consiste en reacciones químicas entre los hidrocarburos del combustible, vapor, dióxido de carbono, oxígeno e hidrógeno en el reactor, así como también reacciones químicas entre los gases generados. De estas reacciones, la gasificación de los carbonizados es la de mayor importancia. El carbonizado producido a través de la pirólisis de la biomasa no es necesariamente carbón puro, ya que contiene una cierta cantidad de hidrocarburos que enlazan hidrógeno y oxígeno.

El carbonizado de biomasa es generalmente más poroso y reactivo que el coque. Su porosidad está en el rango de 40% a 50% mientras que el carbón mineral está entre 2% y 18%. Los poros del carbonizado de biomasa son mucho más grandes (20 a 30 micrones) que los del carbón mineral (~5 angstroms). Por lo tanto, su comportamiento de reacción es diferente al de las variedades del carbón mineral. Por ejemplo, la reactividad de la turba decrece con la conversión o el tiempo, mientras que la reactividad del carbonizado de biomasa se incrementa con la conversión. Esta tendencia puede ser atribuida a la creciente actividad catalítica de los componentes metálicos alcalinos del carbonizado de biomasa. La gasificación de los carbonizados de biomasa involucra varias reacciones entre el carbonizado y los medios gasificantes.



Las ecuaciones (2-4) a (2-7) muestran como los agentes gasificantes como el oxígeno, dióxido de carbono y vapor reaccionan con el carbonizado sólido para convertirlo en gases de bajo peso molecular como el monóxido de carbono, metano e hidrógeno. Algunas de las

reacciones son conocidas con los nombres listados en Tabla 2-4 como R1 (Boudouard) y R3 (hidrogasificación).

Las reacciones de gasificación son por lo general endotérmicas, pero algunas de ellas pueden ser exotérmicas. Por ejemplo, aquellas reacciones de carbono con oxígeno e hidrógeno (R3, R4 y R5 en Tabla 2-4) son exotérmicas, mientras que aquellas con dióxido de carbono y vapor de agua (R1 y R2) son endotérmicas. El calor de reacción dado en Tabla 2-4 para varias reacciones se refieren a una temperatura de 25°C.

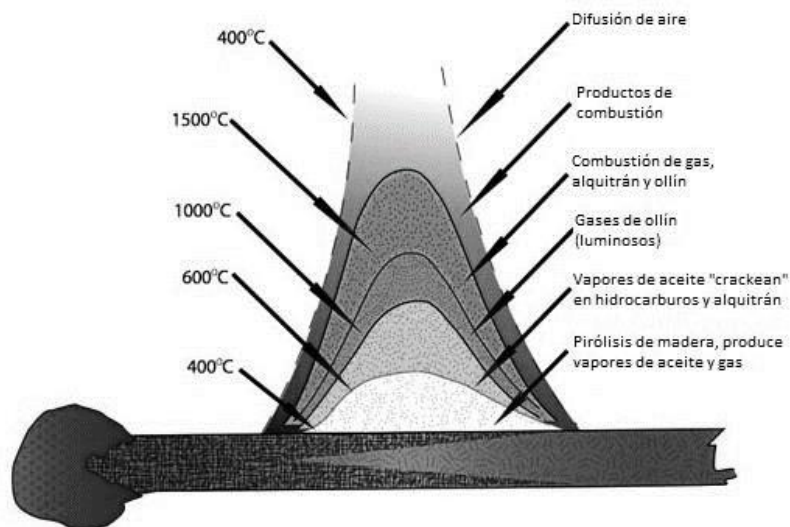
2.4.2.4. Reacciones de combustión de carbonizados

Como se dijo anteriormente, la mayoría de las reacciones de gasificación son endotérmicas. Para proveer el calor de reacción requerido, así como también el calor requerido para el calentamiento, secado y pirólisis, una cierta cantidad de reacción de combustión exotérmica se permite dentro del gasificador. La reacción R5 en la Tabla 2-4 ($C + O_2 \rightarrow CO_2$) es la mejor para este objetivo ya que entrega la mayor cantidad de calor (394 kJ/mol). La siguiente mejor reacción es R 4 ($C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$), la cual también produce el gas combustible CO, aunque sólo produce 111 kJ/mol de calor. La velocidad de R4 es relativamente lenta. Cuando el carbono entra en contacto con el oxígeno, R4 y R5 pueden suceder, pero su extensión depende de la temperatura.

Las cantidades relativas de combustible, oxidante y vapor, si es que se usa, gobiernan la fracción de carbono u oxígeno que entra en las reacciones R4 o R5. Una cantidad de oxidante superior a la necesaria para la reacción endotérmica incrementará la temperatura en el gasificador de manera innecesaria, así como también reducirá la calidad del gas producido al diluirlo con dióxido de carbono.

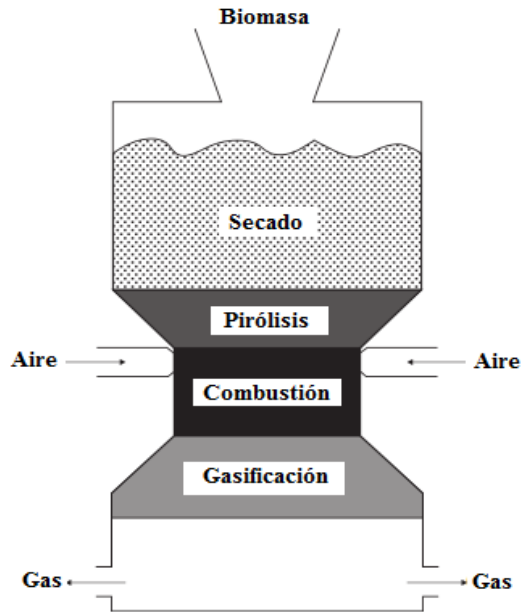
La siguiente Figura 2-6 pertenece al libro *“Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems”* de Reed y Das de 1988. Se consideró oportuno insertar ésta imagen en esta sección, ya que logra representar de manera muy ilustrativa los conceptos aquí discutidos. La llama en la cerilla provee de calor para la pirólisis, y los gases y vapores resultantes se queman en dicha llama luminosa en un proceso llamado combustión con llama. Después de que la llama pasa un cierto punto en la cerilla, el carbonizado puede o no seguir ardiendo (algunas cerillas son tratadas químicamente para prevenir que el carbonizado continúe ardiendo de manera latente). Cuando la llama se extingue, la madera remanente continúa sometándose a pirólisis residual, generando un humo visible compuesto de las gotas condensadas de alquitrán (Reed, 1998). Después de esta imagen, se retoma el resumen del libro de Basu.

Figura 2-6 Pirólisis, gasificación y combustión en una cerilla encendida (Reed, 1998).



Para fines de comparación se presenta en la Figura 2-7, las etapas del proceso de gasificación, como tienen lugar en uno de los reactores más comunes:

Figura 2-7 Esquemático de un gasificador de lecho movedizo tipo “downdraft” (Basu, 2013).



2.4.3. Cinética de gasificación

Cálculos estequiométricos pueden ayudar a determinar los productos de reacción. No todas las reacciones son instantáneas ni convierten totalmente los reactantes en productos. Muchas de las reacciones químicas discutidas en las secciones precedentes se llevan a cabo a una velocidad finita y a una extensión finita. Hasta qué extensión una reacción progresa está determinado por su estado de equilibrio. Sus razones de cinética, por otra parte, determinan qué tan rápido se forman los productos de la reacción y si ésta se completa en el interior del gasificador.

Consideremos la reacción:



Donde n , m , p y q son los coeficientes estequiométricos y k_{ida} es la constante cinética de ida. La velocidad de esta reacción, r_1 , depende de C_A y C_B , que son las concentraciones de los reactantes A y B, respectivamente:

$$r_1 = k_{ida} C_A^n C_B^m \quad (2-9)$$

La reacción también puede ir en sentido inverso:



Donde k_{vuelta} es la constante cinética de vuelta. La velocidad de esta reacción, r_2 , se escribe de manera similar en términos de C_C y C_D , las concentraciones de C y D, respectivamente:

$$r_2 = k_{vuelta} C_C^p C_D^q \quad (2-11)$$

Cuando la reacción comienza, la concentración de los reactantes A y B es alta. Así que la velocidad de reacción de ida, r_1 , es inicialmente mucho más grande que la velocidad de vuelta, r_2 , porque la concentración de los productos es relativamente baja. La reacción en este estado no se encuentra en equilibrio, ya que $r_1 > r_2$. Mientras la reacción progresa, la reacción de ida incrementa la cantidad de productos C y D. Esto incrementa la velocidad de reacción de vuelta. Finalmente, se alcanza una etapa del proceso de gasificación cuando las dos velocidades son iguales entre ellas, $r_1 = r_2$. Este es el estado de equilibrio. Cuando esto ocurre:

- No existe más cambio en las concentraciones de los reactantes y los productos.
- La energía libre de Gibbs del sistema se encuentra en su mínimo valor.
- La entropía del sistema se encuentra en su máximo valor.

En el estado de equilibrio tenemos:

$$r_1 = r_2 \quad (2-12)$$

O sea:

$$k_{ida} C_A^n C_B^m = k_{vuelta} C_C^p C_D^q \quad (2-13)$$

La constante cinética, o constante de velocidad de una reacción, k_i , es independiente de la concentración de los reactantes, pero es dependiente de la temperatura, T . Esta dependencia en la temperatura es expresada en la ecuación de Arrhenius:

$$k = A_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2-14)$$

Donde A_0 es una constante pre-exponencial, R es la constante universal de los gases y E es la energía de activación de la reacción. La relación entre las constantes de velocidad de reacción de ida y vuelta es la constante de equilibrio K_e . De la ecuación (2-13) podemos escribir:

$$K_e = \frac{k_{ida}}{k_{vuelta}} = \frac{C_C^p C_D^q}{C_A^n C_B^m} \quad (2-15)$$

La constante de equilibrio, K_e , depende de la temperatura, pero no de la presión. La Tabla 2-5 muestra los valores de constantes de equilibrio y calores de formación para algunas de las reacciones de gasificación:

Tabla 2-4 Constantes de equilibrio y calores de formación para 5 reacciones de gasificación (Basu, 2013).

Reacción	Constante de Equilibrio (log10K)			Calor de Formación (kJ/mol)	
	298 K	1000 K	1500 K	1000 K	1500 K
$C + 1/2 O_2 \rightarrow CO$	24.065	10.483	8.507	-111.9	-116.1
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	69.134	20.677	13.801	-394.5	-395
$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	8.906	-0.999	-2.59	-89.5	-94
$2C + 2H_2 \rightarrow C_2H_4$	-11.94	-6.189	-5.551	38.7	33.2
$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$	40.073	10.07	5.733	-247.8	-250.5

2.5. El programa MATLAB

Para el presente trabajo se utilizó el software MATLAB en su versión R2013b, que es un potente software de cálculo matemático con matrices. MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, “laboratorio de matrices”) es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux.

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario, GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets). Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo. En los últimos años ha aumentado el número de prestaciones, como la de programar directamente procesadores digitales de señal o crear código VHDL.

Fue creado por el matemático y programador de computadoras Cleve Moler en 1984, surgiendo la primera versión con la idea de emplear paquetes de subrutinas escritas en Fortran en los cursos de álgebra lineal y análisis numérico, sin necesidad de escribir programas en dicho lenguaje. El lenguaje de programación M fue creado en 1970 para proporcionar un sencillo acceso al software de matrices LINPACK y EISPACK sin tener que usar Fortran. En 2004, se estimaba que MATLAB era empleado por más de un millón de personas en ámbitos académicos y empresariales. MATLAB es un programa de cálculo numérico diseñado para trabajar con matrices. Por tanto, será más eficiente si se diseñan los algoritmos en términos de matrices y vectores (Wikipedia - La enciclopedia libre, 2016).

Se eligió este software para desarrollar el programa de simulación concerniente a este trabajo, ya que, como se verá en la sección de metodología, los cálculos se abordan de manera matricial, con datos variando en diferentes combinaciones para las subsecuentes iteraciones de cálculo, que generan una base de datos de tamaño considerable que puede ser manejada como una matriz, lo que hace que el software MATLAB sea idóneo para la tarea.

3. Estado del arte

En 2002, Bompreszi et al, en el artículo titulado: “*The heating value of gas obtained from biomass gasification: a new method for its calculation or prediction*”, presenta una correlación empírica para calcular el poder calorífico inferior (LHV) de los gases obtenidos de la gasificación de algunos tipos comunes de biomasa. Donde 4 tipos de ecuaciones son consideradas: polinomial, potenciada, exponencial y logarítmica, todas conteniendo el parámetro de la temperatura máxima del proceso. Las ecuaciones se obtuvieron mediante la interpolación de los datos experimentales disponibles en la literatura. Con la ayuda de un análisis estadístico, se determinó que, si bien las 4 ecuaciones son válidas dentro del rango de temperaturas considerado, la correlación polinomial fue la que más se acercó a los valores experimentales. (Bompreszi, 2002).

En 2003, Jayah et al, desarrolla un modelo de simulación de un gasificador tipo downdraft para madera con el fin de investigar el impacto de los distintos parámetros de operación (temperatura del aire de entrada, el tamaño de partícula de la madera y el contenido de humedad) y diseño del equipo (perdida de calor y ángulo de la garganta) en la eficiencia de conversión del gas. Como conclusión obtiene que de los parámetros de estudio que más afectan la eficiencia de conversión del equipo son el contenido de humedad de la biomasa y las pérdidas de calor del equipo, también concluye que es conveniente tener temperaturas elevadas en la entrada de aire, pero a comparación de la ganancia de eficiencia en la conversión de gas, este precalentamiento, no resulta ser económicamente viable. En cuanto al ángulo de la garganta concluye que un ángulo pequeño contribuye en la eficiencia de conversión, pero, a la vez, la zona de gasificación debe ser incrementada para lograr la misma eficiencia global del proceso, por lo cual se debe existir un equilibrio entre estos dos parámetros a la hora del diseño. (T.H. Jayah, 2003)

En 2006, Babu et al, desarrolla un modelo de simulación para la zona de reducción de un gasificador downdraft, estudiando con objetivo principal el efecto del factor de

reactividad del char⁶ sobre el proceso global de gasificación. Como conclusiones importantes de este trabajo se pueden destacar que el valor del factor de reactividad del char, que representa la reactividad del char en presencia de oxígeno, debe ser variable a lo largo de la longitud de la zona de reducción, después de analizar varios tipos de comportamientos variables de este parámetro a lo largo de la zona de reducción el autor llega a la conclusión de que el tipo de variación de temperatura más acorde con la realidad es el del tipo exponencial el cual presenta un valor de desviación estándar de 0.091151 con respecto a los valores experimentales mencionados en el artículo de Jayah et al, anteriormente comentado. (B.V. Babu, 2006).

Jarungthammachote, en 2007 presenta su artículo *“Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier”* en el cual se presenta un modelo de simulación de un gasificador downdraft para residuos sólidos municipales teniendo en cuenta el equilibrio químico y la segunda ley de la termodinámica con el fin de encontrar los mejores parámetros de operación y diseño que produzcan la mayor eficiencia posible de todo el proceso de gasificación y además, predecir la composición del gas de síntesis obtenido. Como conclusión el autor principal destaca la importancia del contenido de humedad en la producción de gases relevantes como H_2 y CH_4 , la producción de estos gases se ve incrementada en medida que el contenido de humedad de la biomasa aumenta, pero en detrimento la eficiencia de la segunda ley de la termodinámica se ve afectada negativamente con el incremento de la humedad en la biomasa. Lo que indica que el secado de los residuos municipales y en general de la biomasa son pasos necesarios para un proceso de gasificación efectivo. (S. Jarungthammachote, 2007).

En 2008 M. Balat, de la Universidad de Mah, en Trabzon, Turquía, presenta un estudio titulado *“Hydrogen-Rich Gas Production from Biomass via Pyrolysis and Gasification Processes and Effects of Catalyst on Hydrogen Yield”*. El objetivo del estudio era investigar la producción de hidrógeno a través de pirólisis y gasificación de biomasa.

⁶ Termino en inglés para referirse a los carbonizados resultantes de la pirólisis.

Actualmente el hidrógeno se obtiene de recursos no renovables como el gas natural y el petróleo, pero en principio puede ser generado de recursos renovables como la biomasa a través de 2 procesos termoquímicos: (1) gasificación seguida de la reformación del gas sintetizado, y (2) pirólisis rápida seguida de la reformación de la fracción de hidrocarburo del bioaceite. La reformación por vapor de los hidrocarburos, la oxidación parcial de los residuos pesados del petróleo, reformación por vapor selectiva de compuestos aromáticos y la gasificación de hullas y desechos sólidos para obtener una mezcla de H_2 y CO , seguida por una conversión agua-gas para producir H_2 y CO_2 , son procesos bien establecidos. Se encontró que la producción de hidrógeno de la pirólisis y gasificación por vapor se incrementa con el aumento de la temperatura. En general, la temperatura de gasificación es mayor a la temperatura de la pirólisis y la entrega de hidrógeno de la gasificación es mayor a la de la pirólisis. La gasificación es básicamente un proceso termoquímico el cual convierte materiales lignocelulósicos en productos gaseosos. Los productos de la pirólisis se dividen en una fracción volátil que consiste en gases y vapores y un residuo sólido rico en carbón. La estrategia se basa en producir hidrógeno a partir de la pirólisis de biomasa usando una estrategia de coproducción para reducir el costo del hidrógeno y concluye que sólo ésta estrategia puede competir con el costo de las tecnologías comerciales basadas en hidrocarburos. (Balat, 2008).

En 2009, Mekbib et al, realiza la simulación de un gasificador downdraft para follaje de palma de aceite, el modelo tuvo en cuenta las leyes de conservación de masa y energía y fue desarrollado en el software ASPEN PLUS, como resultado de este estudio se pudo concluir que los mayores contenidos de gases producidos relevantes como lo son el CO , H_2 y el CH_4 son alcanzados con bajos valores de la relación Aire-Combustible, valores altos de temperaturas de oxidación y bajas presiones de operación por debajo de los 5 bar. (Atnaw, 2009).

Rodríguez y Gordillo, en 2011 publican el trabajo “*Adiabatic Gasification and Pyrolysis of Coffee Husk Using Air-Steam for Partial Oxidation*”, en donde analizan el modelado del proceso de gasificación adiabática utilizando mezclas de aire-vapor como

agentes para oxidación parcial, y el análisis termogravimétrico experimental para determinar la energía de activación de la cascarilla de café. Reportan haber utilizado el programa Chemical Equilibrium with Applications (CEA), desarrollado por la NASA, para estimar los efectos de la razón de equivalencia (ER) y la razón vapor a combustible (S:F) en la temperatura de equilibrio y composición del gas de salida. También desarrollaron un modelo de balance atómico para propósitos de comparación. Sus resultados demuestran que el incremento en la razón de equivalencia (ER) y vapor a combustible (S:F) produce mezclas gaseosas ricas en H_2 y CO_2 , pero pobres en CO. Reportan una energía de activación estimada a partir de los datos del análisis termogravimétrico de 221 kJ/kmol. (Rodríguez, 2011).

Pirc, Sekavčnik, y Mori, en 2012 presentaron el trabajo titulado “*Universal Model of a Biomass Gasifier for Different Syngas Compositions*”, el cual expone las características teóricas y técnicas de los gasificadores de biomasa. El modelado del proceso de gasificación requirió un sistema lineal de ecuaciones para representar los balances de material y energía. Se discutieron 3 variantes al respecto de las diferentes composiciones del gas o de la tecnología empleada. Se utilizó el código comercial IPSEpro para modelar el sistema de gasificación. Con el modelo matemático se realizó un análisis paramétrico de la humedad en la biomasa, la composición de la biomasa, la temperatura del gas de salida y la influencia del régimen de operación sobre la eficiencia exergética del sistema. Con base en éste modelo matemático, los resultados obtenidos se compararon con los datos de investigaciones y experimentos previos, y se encontró concordancia entre ellos. Se encontró que los parámetros más influyentes son el tipo de biomasa, la cantidad de humedad presente en la biomasa, la temperatura del gas de salida y el tipo de oxidante. La humedad presente en la biomasa tiene una gran influencia en la eficiencia neta del sistema, se encontró que la mayor eficiencia del sistema fue de 36.5% y se consiguió con una humedad presente en la biomasa de 20%. Cuando el sistema se utiliza para producir calor y potencia al mismo tiempo, la eficiencia de CHP (Combined Heat and Power) se incrementa hasta el 88%. Cuando el gas contiene metano, hidrógeno y monóxido de carbono, se obtiene la máxima eficiencia neta del sistema, mientras que la menor eficiencia neta del sistema ocurre cuando se produce un gas rico en hidrógeno, esto es porque la reacción de reducción del agua es endotérmica. Es

razonable utilizar un gas rico en hidrógeno en sistemas de celdas de combustible. Por otra parte, se encontró que usar oxígeno puro como oxidante es la opción más eficiente en todos los casos, sólo opacada por restricciones económicas. (Pirc, 2012)

Dejtrakulwong y Patumsawad, en 2014, publicaron el trabajo titulado “*Four Zones Modeling of the Downdraft Biomass Gasification Process: Effects of Moisture Content and Air to Fuel Ratio*”, en el que se desarrolló un modelo matemático para un proceso de gasificación de corriente descendente. El modelo propuesto consideró dividir el proceso en 4 módulos: secado, pirólisis, oxidación y reducción, y siendo los productos de un módulo, los reactantes del siguiente módulo. Se aplicó el modelo de velocidad de cinética finita unidimensional en los módulos de secado y reducción. Se encontró que los datos obtenidos de manera experimental, validan los resultados predichos mediante el cálculo. Se encontró que la altura de las zonas de secado y pirólisis incrementan con el aumento del contenido de humedad, mientras que la altura crítica de la zona de reducción disminuye a la vez. (Dejtrakulwong, 2014)

4. Metodología

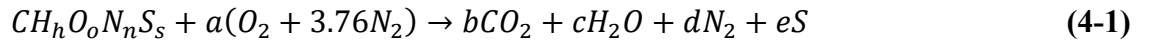
En la presente sección se expone la metodología que se siguió para plantear y resolver el problema de la simulación numérica del proceso de gasificación y se describe la lógica detrás del programa que se escribió en MATLAB para tal propósito.

Para comenzar, a continuación, se enlistan las consideraciones iniciales que se tomaron en cuenta para poder delimitar y simplificar el problema:

- El proceso de gasificación se trata de un proceso termodinámico ideal, adiabático, que se desarrolla bajo la máxima eficiencia térmica posible, sin pérdidas de energía diferentes a las ligadas al aumento de entropía inherente a las reacciones químicas.
- El proceso se lleva a cabo sobre una kilomol empírica de biomasa equivalente, con el carbono como elemento base, por lo que la fórmula siempre contendrá una unidad de carbono y las cantidades de los demás elementos serán calculados a partir de ella.
- Se considera que el sistema se encuentra en un volumen cerrado, sin intercambios de materia ni energía con el medio, aunque se reserva la posibilidad de inyectar energía al sistema en forma de calor si el usuario lo requiere, anulando con esto la condición adiabática.
- El sistema se encuentra trabajando en estado estacionario o permanente, por lo tanto, no existen respuestas transitorias.
- Como el proceso tiene lugar a nivel molecular, las propiedades de la biomasa como la densidad, porosidad, tamaño de partícula y similares, no se consideran influyentes en este estudio.

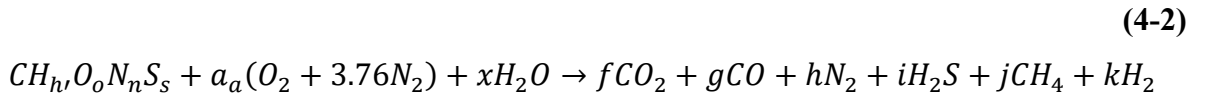
4.1. Definición de Reacciones y Parámetros Involucrados

La reacción mostrada en la ecuación (4-1) representa la reacción de combustión estequiometría de una molécula de biomasa llevada a oxidación completa hasta dióxido de carbono. Donde $CH_hO_oN_nS_s$ representa la expresión general de biomasa, y $a(O_2 + 3.76N_2)$ representa las unidades molares de aire requerido en la reacción estequiométrica de la siguiente manera:



Los subíndices h , o , n y s , son obtenidos por análisis gravimétrico en base seca sobre los componentes de la biomasa utilizada en particular. Los coeficientes a , b , c , d y e son obtenidos a partir de las ecuaciones del balance atómico de la reacción (S no se oxida y se considera que sale como azufre libre).

La reacción mostrada en la ecuación (4-2) representa la reacción de combustión de una molécula de biomasa a oxidación incompleta con CO presente, en ésta reacción solo se muestran los productos más importantes para este trabajo (la posibilidad de que se formen óxidos de nitrógeno NO_x y óxidos de azufre SO_x se descarta debido a que las temperaturas finales calculadas no son suficientemente altas, siendo $1500^\circ C$ la temperatura que se considera mínima para la aparición de tales compuestos (Çengel & Boles, 2006). A diferencia de la reacción en la ecuación (4-1) que solo utiliza aire como fuente oxidante, esta reacción en ecuación (4-2) utiliza la mezcla Vapor-Aire como fuente oxidante.



Donde a_a representa la cantidad de aire actual que participa en la reacción en la ecuación (4-2), y es diferente de a , que es el aire estequiométrico en la ecuación (4-1). Los coeficientes f , g , h , i , j y k se obtienen mediante la combinación del balance atómico y la

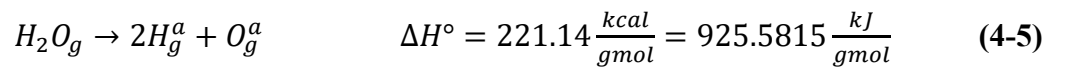
cinética involucrada en la reacción conjunta de las ecuaciones (4-1) y (4-2). Se han definido 2 relaciones las cuales el usuario tiene la posibilidad de modificar. Estas son: La razón de equivalencia **ER**,

$$ER = \frac{a}{a_a} \quad (4-3)$$

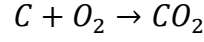
Y la razón de vapor de agua en base molar a la biomasa general **x**

$$x = S/F = \frac{MolesVapor}{MolesCombustible} \quad (4-4)$$

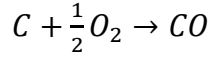
La obtención de H₂ y CH₄ en la reacción de la ecuación (4-2), requiere inicialmente alta energía que permita el rompimiento de los enlaces covalentes que están presentes en la cantidad de H₂O que se otorgue a la reacción de la ecuación (4-2). La ausencia de vapor de agua inicial, x = 0, hace que sólo esté presente en la reacción global, la cantidad de H₂O que logre proporcionar la reacción de la ecuación (4-1). Esta alta energía puede ser obtenida iniciando la combustión bajo las condiciones de la reacción de la ecuación (4-1). Para el rompimiento de dichos enlaces, la reacción involucrada es:



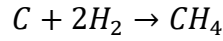
Donde la gasificación del H₂O en gases atómicos activados de Hidrógeno y Oxígeno, que son altamente reactivos (Castellan, 1987) requiere lograr una temperatura suficiente para abastecer la demanda de ésta última reacción. No obstante, lo anterior, es factible lograr el otorgamiento de dicha energía. La energía de activación necesaria *E* se encuentra asociada con la velocidad de reacción que se logre mediante la cinética involucrada de las siguientes reacciones molares elementales, las cuales modelan el proceso global de gasificación (Rodriguez, 2011):



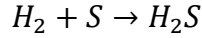
$$\Delta H^\circ = -393.654 \frac{kJ}{gmol} \quad \Delta G^\circ = -394.524 \frac{kJ}{gmol} \quad (4-6)$$



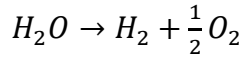
$$\Delta H^\circ = -110.563 \frac{kJ}{gmol} \quad \Delta G^\circ = -137.317 \frac{kJ}{gmol} \quad (4-7)$$



$$\Delta H^\circ = -74.8744 \frac{kJ}{gmol} \quad \Delta G^\circ = -50.812 \frac{kJ}{gmol} \quad (4-8)$$



$$\Delta H^\circ = -20.1532 \frac{kJ}{gmol} \quad \Delta G^\circ = -33.032 \frac{kJ}{gmol} \quad (4-9)$$



$$\Delta H^\circ = 241.9131 \frac{kJ}{gmol} \quad \Delta G^\circ = 228.6777 \frac{kJ}{gmol} \quad (4-10)$$

Es evidente que a condiciones de temperatura estándar e iguales cantidades molares (1 gmol), las reacciones presentes en la ecuación (4-6) a la ecuación (4-9) ($\Delta H^\circ_{suma} = -599.2446 \frac{kJ}{gmol}$) no logran igualar en magnitud la energía necesaria para la gasificación atómica del H_2O .

Sea α la conversión extendida en fracción o avance de reacción de la biomasa general, sea α_1 la fracción de la biomasa que reacciona en la ecuación (4-1). Sea α_2 la fracción de la biomasa que reacciona en la ecuación (4-2). Donde entonces la conversión molar extendida de la biomasa general queda representada en la siguiente Ecuación

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (4-11)$$

La razón de fracciones de avances de la ecuación (4-2) con respecto a la ecuación (4-1) se define como:

$$r = \alpha_2 / \alpha_1 \quad (4-12)$$

En la ecuación (4-2), todo el carbono que reacciona está contenido en el CO₂, CO y CH₄, entonces la distribución del carbono en ecuación (4-2) cumple con la condición expuesta en la siguiente ecuación (4-13):

$$\alpha_2 = f + g + j \quad (4-13)$$

Entonces es factible expresar la ecuación (4-13) como una suma de fracciones de la siguiente manera:

$$1 = \frac{f}{\alpha_2} + \frac{g}{\alpha_2} + \frac{j}{\alpha_2} \quad (4-14)$$

Sean entonces x_1 , x_2 y x_3 las fracciones molares individuales que representan la forma en que se distribuye el carbono de la reacción en la ecuación (4-2), la ecuación (4-14) puede expresarse como:

$$1 = x_1 + x_2 + x_3 \quad (4-15)$$

En consecuencia, los subíndices f , g y j , de las moléculas de CO₂, CO y CH₄ en la ecuación (4-2), pueden despejarse para obtener las siguientes ecuaciones:

$$f = \alpha_2 x_1 \quad (4-16)$$

$$g = \alpha_2 x_2 \quad (4-17)$$

$$j = \alpha_2 x_3 \quad (4-18)$$

Ahora se puede definir una nueva relación, llamada r_1 , la razón del monóxido de carbono a dióxido de carbono:

$$r_1 = x_2 / x_1 \quad (4-19)$$

Ésta razón permite definir las x_2 y x_3 en relación al valor que tome x_1 y r_1 . Ya que ninguna de las tres x puede ser negativa, las expresiones de x_2 y x_3 son las siguientes:

$$x_2 = r_1 x_1 \quad (4-20)$$

$$x_3 = 1 - (1 + r_1)x_1 \quad (4-21)$$

Y, en consecuencia, si se sabe que x_3 debe ser mayor o igual a 0, x_1 puede despejarse de la ecuación (4-21) en la siguiente desigualdad:

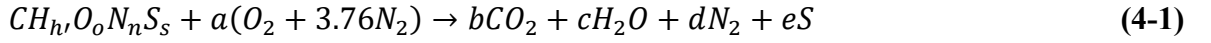
$$x_1 \leq \frac{1}{1+r_1} \quad (4-22)$$

Cuando x_1 toma el valor más cercano a la igualdad, se está minimizando la cantidad de CH_4 , mientras que se maximiza la cantidad de H_2 , donde la condición de igualdad representa la total ausencia de CH_4 y la máxima cantidad posible de H_2 . No obstante las relaciones de la matemática y la cinética química involucrada en las reacciones de la ecuación (4-1) y de la ecuación (4-2), requieren la presencia infinitesimal del CH_4 . La razón de esto último se presenta posteriormente del balance atómico.

4.2. Balance atómico de las reacciones principales

Aplicando el principio de conservación de la masa, se lleva a cabo el balance atómico de las reacciones en las ecuaciones (4-1) y (4-2), con ayuda de las relaciones definidas en la sección anterior.

4.2.1. Reacción de combustión primaria o estequiométrica



Para el carbono (C): la molécula de biomasa en el lado izquierdo de la ecuación está calculada con base en un átomo de carbono o mol, y la cantidad de biomasa que reacciona en la ecuación (4-1) está determinada por α_1 , mientras que en el lado derecho de la reacción el carbono sólo aparece en CO_2 , por lo tanto, el coeficiente b está determinado por:

$$b = \alpha_1 \quad (4-23)$$

Para el hidrógeno (H): la cantidad de hidrógeno en los reactivos es igual a h , y el hidrógeno en los productos sólo aparece formando parte del agua, cuya cantidad está representada por c , por lo tanto:

$$c = \frac{(\alpha_1 h')}{2} \quad (4-24)$$

Para el oxígeno (O): en los reactivos, el oxígeno aparece tanto en la biomasa como en el aire, por lo que deben de sumarse sus cantidades, mientras que en los productos aparece como parte del dióxido de carbono y el agua, cuyas cantidades también deberán sumarse para poder despejar a , que es la cantidad de aire estequiométrico para la reacción:

$$a = \frac{(2b+c-\alpha_1 o)}{2} \quad (4-25)$$

Para el nitrógeno (N_2): el nitrógeno aparece en los reactivos como parte de la biomasa y el aire, por lo que sus cantidades deben sumarse, y en los productos aparece como nitrógeno molecular, debido a que se considera como no reactivo:

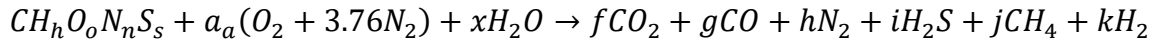
$$d = \frac{(2(3.76)a+\alpha_1 n)}{2} \quad (4-26)$$

Para el azufre (S): el azufre se considera no reactivo, por lo tanto:

$$e = \alpha_1 s \quad (4-27)$$

4.2.2. Reacción de combustión secundaria

(4-2)



Para a_a del balance de materia de la sección anterior, se conoce el valor de a , y la relación de **ER** ya había sido definida en la ecuación (4-3), donde **ER** es uno de los parámetros definidos por el usuario:

$$a_a = \frac{a}{(ER)} \quad (4-28)$$

Para el dióxido de carbono (CO₂): la cantidad de dióxido de carbono f ya había sido definida anteriormente en la ecuación (4-16):

$$f = \alpha_2 x_1 \quad (4-16)$$

Para el monóxido de carbono (CO): la cantidad de dióxido de carbono g ya había sido definida anteriormente en la ecuación (4-17):

$$g = \alpha_2 x_2 \quad (4-17)$$

Salida de agua: la cantidad de agua presente en la reacción de la ecuación (4-1), c , sumada a la cantidad de vapor x en los reactivos de la reacción en la ecuación (4-2), debe ser igual a la suma de los coeficientes de los compuestos que contengan hidrógeno en los productos de la reacción en la ecuación (4-2). Más adelante, en el cálculo de la cinética química del hidrógeno, se encontró que los términos que incluían a , k y h aparecían repetidos en el mismo formato, por lo que, con intenciones de simplificar los cálculos, se decidió agrupar dichos términos para definir una nueva variable molar x_4 , que queda expresada en la ecuación (4-30). Idealmente, el resultado de la reacción en la ecuación (4-29) debe ser igual a 0, lo que significa que toda el agua disponible ha reaccionado, de no ser así, el programa deberá ajustar los valores para una nueva iteración:

$$\text{Salida de agua} = (x + c) - (x_4 + 2j + i) \quad (4-29)$$

$$x_4 = \frac{(2k - \alpha_2 h')}{2} \quad (4-30)$$

Para el nitrógeno (N₂): el nitrógeno que aparece en los productos de la reacción en la ecuación (4-2), debe ser igual a la suma del nitrógeno en el aire y el nitrógeno en la biomasa:

$$h = \frac{(2(3.76)a_a + \alpha_2 n)}{2} \quad (4-31)$$

Para el (H₂S): el sulfuro de hidrógeno proviene enteramente del azufre en la biomasa, por lo tanto:

$$i = \alpha_2 s \quad (4-32)$$

Para el metano (CH₄): la cantidad de metano j ya había sido definida anteriormente en la ecuación (4-18):

$$j = \alpha_2 x_3 \quad (4-18)$$

Para el hidrógeno (H₂): de la ecuación (4-30), se puede despejar k :

$$k = \frac{(2x_4 + \alpha_2 h')}{2} \quad (4-33)$$

Salida de oxígeno: al ser un proceso de gasificación por pirólisis, donde por definición existe un defecto de oxígeno, no debe aparecer oxígeno sin reaccionar en los productos, por lo tanto, la salida de oxígeno debe ser igual a 0, si no es así, el programa deberá ajustar los valores para una nueva iteración. Por la misma razón que llevó a definir x_4 , se define una nueva variable, x_5 , que contiene a x_3 y s , y se expresa en la ecuación (4-35):

$$\text{Salida de oxígeno} = \frac{(x_4 + x_5 - \alpha_2(2x_1 + x_2 + o))}{2} \quad (4-34)$$

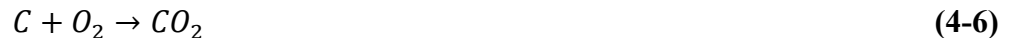
$$X_5 = \alpha_2(2x_3 + s) = 2j + i \quad (4-35)$$

4.3. Avances de las reacciones químicas combinadas

Existen 3 juegos de cinéticas involucradas, la más importante y que rige a las otras dos es la basada en el carbono, estos 3 juegos son:

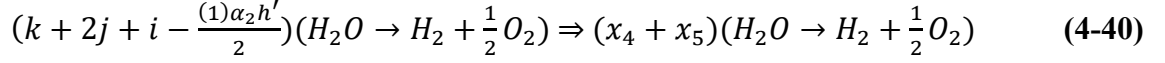
- Con base en el Carbono, las reacciones involucradas son: ecuación (4-6), ecuación (4-7) y ecuación (4-8).
- Con base en el Hidrógeno, las reacciones involucradas son: ecuación (4-8), ecuación (4-9) y ecuación (4-10).
- Con base en el Oxígeno, las reacciones involucradas son: ecuación (4-6), ecuación (4-7) y ecuación (4-10).

Se presentan nuevamente dichas reacciones molares elementales para facilitar la lectura:



Al multiplicar cada reacción por el coeficiente del producto correspondiente que aparece en los productos de la reacción en la ecuación (4-2), tenemos:





Al analizar la ecuación (4-40), se observa que en los coeficientes que multiplican a la reacción elemental aparecen los términos equivalentes a x_4 y x_5 , definidos previamente en las ecuaciones (4-30) y (4-35). Por simplificación, dichos términos son sustituidos a partir de éste punto.

Ya que el nitrógeno no es reactivo en la ecuación (4-1) ni en ecuación (4-2), las fracciones molares deben ser modificadas para sólo contener las especies involucradas en las reacciones:

$$P_T = (\frac{P_T}{1-x_{N_2}})(x_{CO_2} + x_{CO} + x_{H_2O} + x_{H_2S} + x_{CH_4} + x_{H_2} + x_{O_2}) \quad (4-41)$$

$$x'_{CO_2} = \frac{x_{CO_2}}{1-x_{N_2}} \quad (4-42)$$

$$x'_{CO} = \frac{x_{CO}}{1-x_{N_2}} \quad (4-43)$$

$$x'_{H_2O} = \frac{x_{H_2O}}{1-x_{N_2}} \quad (4-44)$$

$$x'_{H_2S} = \frac{x_{H_2S}}{1-x_{N_2}} \quad (4-45)$$

$$x'_{CH_4} = \frac{x_{CH_4}}{1-x_{N_2}} \quad (4-46)$$

$$x'_{H_2} = \frac{x_{H_2}}{1-x_{N_2}} \quad (4-47)$$

$$x'_{O_2} = \frac{x_{O_2}}{1-x_{N_2}} \quad (4-48)$$

Por simplicidad, a partir de éste punto, cuando se hable de las presiones parciales, será en referencia a las presiones parciales modificadas, no siendo necesario el apóstrofe.

4.3.1. Análisis de las reacciones del carbono

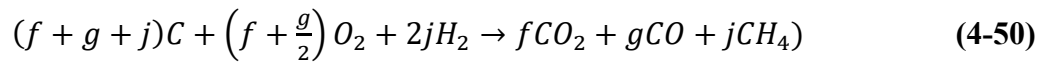
Las reacciones que involucran al carbono, son:



Donde la función de Gibbs estándar para el carbono es:

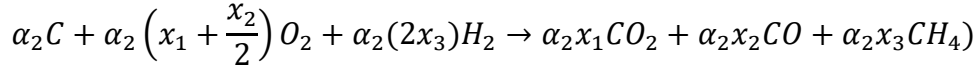
$$\Delta G_C^o = \alpha_2(x_1\Delta\hat{G}_{CO_2}^o + x_2\Delta\hat{G}_{CO}^o + x_3\Delta\hat{G}_{CH_4}^o) \quad (4-49)$$

Sumando las 3 reacciones del carbono, se obtiene:



Si se sustituyen f , g y j para re-expresar la ecuación en términos de x_1 , x_2 y x_3 , según las definiciones presentadas en las ecuaciones (4-16), (4-17), (4-18), se obtiene:

(4-51)



Se obtiene la constante de equilibrio K_{eC} , donde el subíndice C denota que se refiere al carbono, y se utilizan las presiones parciales P como medida de la concentración de las especies. El carbono sólido no se utiliza ya que no posee presión.

$$K_{eC} = \left[\frac{P_{CO_2}^{x_1} P_{CO}^{x_2} P_{CH_4}^{x_3}}{P_{O_2}^{(x_1+x_2/2)} P_{H_2}^{2x_3}} \right]^{\alpha_2} \quad (4-52)$$

4.3.2. Análisis de las reacciones del hidrógeno

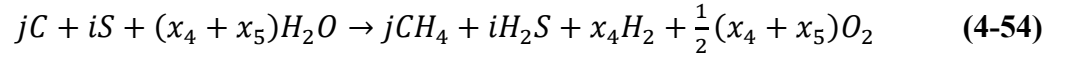
Las reacciones que involucran al hidrógeno, son:



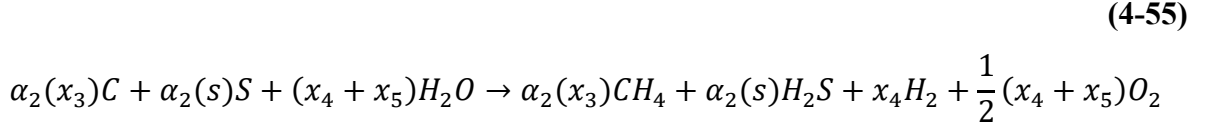
Donde la función de Gibbs estándar para el hidrógeno es:

$$\Delta G_H^o = \alpha_2 (x_3 \Delta \hat{G}_{CH_4}^o + s \Delta \hat{G}_{H_2S}^o) + (x_4 + x_5) \Delta \hat{G}_{H_2O}^o \quad (4-53)$$

Al sumar las 3 reacciones del hidrógeno, se obtiene:



Si se sustituyen j e i para re-expresar la ecuación en términos de las definiciones presentadas en las ecuaciones (4-18) y (4-32), se obtiene:



Y la constante de equilibrio K_{eH} es:

$$K_{eH} = \frac{P_{CH_4}^{\alpha_2(x_3)} P_{H_2S}^{\alpha_2(s)} P_{H_2}^{x_4} P_{O_2}^{\frac{1}{2}(x_4+x_5)}}{P_{H_2O}^{(x_4+x_5)}} \quad (4-56)$$

Donde una vez más, las especies sólidas (C y S) no participan y se utilizan las presiones parciales modificadas sin la presencia de N_2 .

4.3.3. Análisis de las reacciones del oxígeno

Las reacciones que involucran al oxígeno, son:



Donde la función de Gibbs estándar para el oxígeno es:

$$\Delta G_O^o = \alpha_2(x_1 \Delta \hat{G}_{CO_2}^o + x_2 \Delta \hat{G}_{CO}^o) + (x_4 + x_5) \Delta \hat{G}_{H_2O}^o \quad (4-58)$$

Al sumar las 3 reacciones del oxígeno, se obtiene:

$$\begin{aligned} (f + g)C + (x_4 + x_5)H_2O \\ \rightarrow fCO_2 + gCO + (x_4 + x_5)H_2 + \frac{1}{2}(x_4 + x_5 - \alpha_2(2x_1 + x_2))O_2 \end{aligned}$$

Si se sustituyen f y g por sus expresiones en ecuaciones (4-16) y (4-17), se obtiene:

$$\begin{aligned} (\alpha_2 x_1 + \alpha_2 x_2)C + (x_4 + x_5)H_2O \\ \rightarrow \alpha_2 x_1 CO_2 + \alpha_2 x_2 CO + (x_4 + x_5)H_2 + \frac{1}{2}(x_4 + x_5 - \alpha_2(2x_1 + x_2))O_2 \end{aligned} \quad (4-59)$$

Y la constante de equilibrio K_{eO} sin el carbono sólido, es:

$$K_{eO} = \frac{P_{CO_2}^{\alpha_2 x_1} P_{CO}^{\alpha_2 x_2} P_{H_2}^{(x_4 + x_5)} P_{O_2}^{\frac{1}{2}(x_4 + x_5 - \alpha_2(2x_1 + x_2))}}{P_{H_2O}^{(x_4 + x_5)}} \quad (4-60)$$

4.3.4. Balance de energía general para la obtención de la temperatura final de los gases de salida

Para poder aplicar un balance de energía al sistema, es necesario conocer los cambios en las entalpías de los reactivos y los productos, es decir, de la biomasa, del aire, del vapor y de los gases de salida; y las entalpías de reacción de las especies involucradas.

Los cambios entálpicos de la biomasa, del aire, del vapor y de los gases de salida, pueden calcularse si se conocen los calores específicos a presión constante, C_p , para cada especie. Para efectos de éste caso de estudio, es necesario que el C_p de cada especie se conozca en términos de los coeficientes a , b , c , d y e , que son los coeficientes en la ecuación para el cálculo de C_p como una función de la temperatura:

$$C_p(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4 \quad (4-61)$$

Los mismos coeficientes a , b , c , d y e , de la ecuación (4-61), pueden utilizarse para calcular directamente el cambio entálpico de la especie, con la siguiente ecuación:

$$\Delta H(T_1, T_2) = a(T_2 - T_1) + \frac{b}{2}(T_2^2 - T_1^2) + \frac{c}{3}(T_2^3 - T_1^3) + \frac{d}{4}(T_2^4 - T_1^4) + \frac{e}{5}(T_2^5 - T_1^5) \quad (4-62)$$

Desgraciadamente, para muchas biomásas no existen datos reportados sobre su C_p , que surgen de pruebas de laboratorio. Si el usuario conoce el C_p de la biomasa en cuestión, el programa puede calcular el cambio entálpico mediante la ecuación (4-62), en caso de desconocer el dato, la temperatura inicial de la biomasa T_{bio} , deberá ser igual a la temperatura estándar T_0 , para que entonces el cambio entálpico valga 0 y no afecte los cálculos.

Las entalpías de reacción (que realmente son un cambio entálpico en sí mismas) de las especies involucradas son leídas de tablas, así que para calcular el cambio entálpico de reacción total, basta con multiplicar cada entalpía de reacción de cada especie, por la fracción molar de la especie en cuestión, y después sumar los resultados, como indica la siguiente ecuación:

$$\Delta H_r^\circ = \sum_x (mol_x * \Delta h_{r_x}^\circ) \quad (4-63)$$

Donde ΔH_r° representa la entalpía de reacción total, mol_x representa la fracción molar de la especie x , y $\Delta h_{r_x}^\circ$ representa la entalpía de reacción por unidad molar de la especie x .

Aplicando la primera ley de la termodinámica al sistema, se obtiene la ecuación (4-64), que presenta el balance de energía en función de la temperatura final de los gases del sistema.

$$F(T_{fin}) = [\Delta H_{bio}]_{T_{bio}}^{T_0} + [\Delta H_{aire}]_{T_{aire}}^{T_0} + [\Delta H_{vap}]_{T_{vap}}^{T_0} + [\Delta H_{vap}]_{T_{vap}}^{T_0} + [\Delta H_r^\circ] + [\Delta H_{fin}]_{T_0}^{T_{fin}} - Q = 0 \quad (4-64)$$

Donde $[\Delta H_{bio}]_{T_{bio}}^{T_0}$ representa el cambio en la entalpía de la biomasa, medida entre la temperatura inicial de la biomasa T_{bio} y la temperatura estándar T_0 ; $[\Delta H_{aire}]_{T_{aire}}^{T_0}$ representa el cambio en la entalpía del aire, medida entre la temperatura inicial del aire T_{aire} y la temperatura estándar T_0 ; $[\Delta H_{vap}]_{T_{vap}}^{T_0}$ representa el cambio en la entalpía del vapor, medida entre la temperatura inicial del vapor T_{vap} y la temperatura estándar T_0 ; $[\Delta H_r^\circ]$ representa el cambio en la entalpía de reacción de las especies involucradas; $[\Delta H_{fin}]_{T_0}^{T_{fin}}$ representa el cambio en la entalpía de los gases de salida, medida entre la temperatura estándar T_0 y la temperatura final de los gases de salida T_{fin} ; y Q , que representa la energía añadida al sistema en forma de calor, ya que aun cuando el sistema en estudio se planteó como un sistema adiabático, se consideró adecuado para efectos de simulación, incluir la posibilidad de introducir energía al sistema. Aunque la solución matemática puede contener más de una raíz, el resultado que se considera válido es la primera raíz encontrada en una búsqueda ascendente de la misma, ya que el proceso de calentamiento hace que la temperatura ascienda progresivamente, y no representa ningún proceso oscilatorio. Todos los datos necesarios para

el cálculo de ésta sección, se encuentran en un archivo binario llamado Dh.mat, el cual se describe en el apéndice correspondiente.

4.3.5. Cinética Química, la determinación de los valores A , E y la función $g(\alpha)$

La cinética combinada de ambas reacciones en la ecuación aire combustible (2-2) y (4-2), puede ser definida si la conversión extendida α , presentada previamente en la ecuación (4-11), se introduce en la siguiente ecuación (4-65), que representa el cambio de α con respecto al tiempo t , (ecuación de Arrhenius):

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{A}{\beta} e^{-\left(\frac{E}{RT}\right)} f(\alpha) \quad (4-65)$$

Donde A es la constante pre-exponencial de la ecuación de Arrhenius, E es la energía de activación necesaria para iniciar las reacciones en las ecuaciones (2-2) y (4-2), R es la constante universal de los gases ideales, T es la temperatura y $f(\alpha)$ es la expresión del avance de la reacción medido con α , y resulta de la cinética combinada de las reacciones de las ecuaciones (4-1) y (4-2).

La rata de calentamiento β se define en la siguiente ecuación (4-66):

$$\beta = \frac{dT}{dt} \quad (4-66)$$

La ecuación (4-65) y la ecuación (4-66) pueden ser combinadas para presentar la razón de cambio de la conversión α con respecto a la temperatura mediante la ecuación (4-67):

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} e^{-\left(\frac{E}{RT}\right)} f(\alpha) \quad (4-67)$$

Reagrupando variables semejantes e integrando desde 0 hasta α y desde T_0 hasta la temperatura final T_{fin} , obtenemos la expresión para la nueva función $g(\alpha)$ en la siguiente ecuación:

$$g(\alpha) = \int_0^\alpha \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^{T_{fin}} e^{-\left(\frac{E}{RT}\right)} dT = \frac{AE}{R\beta} h\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (4-68)$$

La función $f(\alpha)$ es desconocida, lo que imposibilita obtener una solución analítica de la primera integral. La segunda integral desafortunadamente no puede resolverse en forma analítica; sin embargo, puede reagruparse para conformar la nueva función $h\left(\frac{E}{RT}\right)$ que se define en la siguiente ecuación:

$$h\left(\frac{E}{RT}\right) = \frac{R}{E} \int_{T_0}^{T_{fin}} e^{-\left(\frac{E}{RT}\right)} dT = \left(\frac{R}{E}\right) * I \quad (4-69)$$

Donde:

$$I = \int_{T_0}^{T_{fin}} e^{-\left(\frac{E}{RT}\right)} dT \quad (4-70)$$

Se propone la transformación logarítmica de $g(\alpha)$ para un mejor manejo numérico, de la siguiente manera:

$$\ln g(\alpha) = \ln \left(\frac{AE}{R} \right) - \ln \beta + \ln \left[h \left(\frac{E}{RT} \right) \right] \quad (4-71)$$

$$\ln \beta = \ln \left(\frac{AE}{Rg(\alpha)} \right) + \ln \left[h \left(\frac{E}{RT} \right) \right] \quad (4-72)$$

$$\ln \left(\frac{AE}{Rg(\alpha)} \right) = \ln \beta - \ln \left[h \left(\frac{E}{RT} \right) \right] \quad (4-73)$$

La integral de la ecuación (4-69) puede evaluarse numéricamente, la función $g(\alpha)$ y las constantes A y E pueden obtenerse a través de la generación de una función de correlación mediante el procedimiento descrito en el siguiente numeral.

4.3.6. Regresión estadística para la obtención de la función $g(\alpha)/A$ y la constante E

De la ecuación (4-73), se renombran sus términos de la siguiente forma:

$$Y_1 = \ln \left(\frac{AE}{Rg(\alpha)} \right) \quad (4-74)$$

$$Y_2 = \ln \beta \quad (4-75)$$

$$Y_3 = \ln H \quad (4-76)$$

Donde:

$$H = h \left(\frac{E}{RT} \right) = \frac{R}{E} * I \quad (4-77)$$

En consecuencia:

$$Y_1 = Y_2 - Y_3 \quad (4-78)$$

Si de la ecuación (4-74) se despeja $g(\alpha)/A$, se obtiene:

$$\frac{g(\alpha)}{A} = e^{-Y_1} \quad (4-79)$$

A partir de las ecuaciones obtenidas hasta ahora, es posible construir una base de datos sobre la cual aplicar regresión lineal simple para obtener la expresión de $g(\alpha)/A$. Para construir la base de datos, se evalúan las ecuaciones mencionadas variando los parámetros de estimación α , β , ER , X y E_{teo} . Cada parámetro de estimación puede tomar entre 4 y 7 valores (a decisión del usuario), espaciados equitativamente entre un valor máximo y uno mínimo, que dependen del parámetro en cuestión.

Tabla 4-1 Valores máximos y mínimos de los parámetros de estimación para la creación de una base de datos.

	α	β	ER	X	$E_{Teorica}$
Valor Max.	1	75	6	0.8	260
Valor Min.	0.2	15	1	0	100

Con estos datos se calcula la integral I (ecuación (4-70)), con I se calcula H (ecuación (4-77)), y con H se calcula Y_3 (ecuación (4-76)). Para calcular Y_2 , se aplica la ecuación (4-75). Ya con los valores de Y_2 y Y_3 se calcula Y_1 , según la ecuación (4-78). Con el valor de Y_1 , ya es posible calcular el valor que $g(\alpha)/A$ toma para una condición particular definida por los parámetros de estimación utilizados para esa iteración en particular, según la ecuación (4-79). Ya que se tiene calculado un valor de $g(\alpha)/A$ para cada combinación de parámetros de estimación, se aplica regresión lineal simple al conjunto de valores de $g(\alpha)/A$ como respuesta, y el tiempo t como variable, y se obtiene la expresión que representa a la función. El tiempo t en minutos, se calcula a partir de la rata de calentamiento β y la temperatura final T_{fin} .

Para calcular la energía de activación estimada, se aplica regresión lineal simple sobre I como respuesta y T_{fin} como variable. Como resultado de la regresión, se conoce el

valor de la pendiente de I , que, en la metodología de la regresión lineal simple, se representa como $\hat{\beta}_1$. Por definición, el valor de la derivada de una función evaluada en un punto determinado, es igual al valor de la pendiente de la función en dicho punto, así que si se toma la ecuación (4-70) y se deriva I con respecto a T , se obtiene:

$$\frac{dI}{dT} = e^{-\left(\frac{E}{RT}\right)} = \hat{\beta}_1 \quad (4-80)$$

De la ecuación (4-80) se puede despejar la energía de activación E , para obtener la siguiente ecuación:

$$E = -RT_{fin} \ln \hat{\beta}_1 \quad (4-81)$$

Y con ésta ecuación, se obtiene el valor de la energía de activación para cada combinación de parámetros de estimación dados.

4.4. Descripción de la lógica del programa

El programa principal, llamado Gasificacion.m, contiene 7 subprogramas que son:

- IntroMM.m
- BalanceM.m
- CalculoM.m
- BalanceE.m
- IntTotal.m
- RegEst.m
- TextosG.m
- Y el archivo binario Dh.mat de datos termodinámicos.

El programa principal, **Gasificacion.m**, inicia manejando textos que guían al usuario en la forma en que debe introducir los datos. En el subprograma **TextosG.m** se encuentran los textos que presenta el programa. Se despliega un menú con las 3 opciones que permite el programa: 1.- Elaborar estudio, 2.- Generar reportes y 3.- Salir del programa.

Para comenzar un estudio nuevo, se debe elegir la opción 1. Si se le indica al programa, generará un reporte de texto llamado **Bitacora1.txt**, donde se guardará todo lo que aparezca en pantalla para la opción 1. El programa solicita la información de la biomasa, ya sea en forma de un análisis gravimétrico, o bien como la fórmula química empírica de la biomasa.

También se solicita la información correspondiente al aire utilizado en la reacción, habiendo 2 opciones: aire teórico 79/21 molar, o aire “personalizado”, para el cual se solicita el % molar de oxígeno, y el programa supone que la diferencia corresponde al nitrógeno. Con estos datos, el programa calcula y Muestra en pantalla la siguiente información: átomos de los elementos presentes en la biomasa por cada átomo de carbono presente en la biomasa (fórmula empírica), masa molecular empírica de la biomasa, y la razón molar N/O del aire; éstos cálculos los realiza el subprograma **IntroMM.m**.

A continuación solicita las condiciones iniciales: presión total del sistema en mmHg (entre 500 y 2280), temperatura inicial de la biomasa, en caso de que no se conozca el calor específico de la biomasa, la temperatura deberá ser de 25°C o temperatura estándar, si se conoce el calor específico, la temperatura puede tomar un valor diferente y el calor específico deberá ser reportado como los coeficientes **a**, **b** y **c** de la correlación polinómica cuadrática, temperatura inicial del aire, temperatura del vapor de agua, que deberá ser congruente con la presión del sistema, y el calor que se añade al sistema, si se quiere un estudio diferente al adiabático.

Después el programa solicita el número de valores para los parámetros de estimación que se utilizarán en las regresiones estadísticas para la estimación de la función $g(\alpha)/A$ y la energía de activación. El número de valores se acotó entre 4 y 7, pudiendo elegir el usuario cualquier valor, mientras más grande el número de parámetros, es mayor la precisión del valor estimado, pero el tiempo de cálculo aumenta también. Los parámetros de estimación son α , β , ER , X y E_{teo} .

A continuación, el programa calcula el balance de materia con el subprograma **BalanceM.m**, el cual a su vez invoca al subprograma **CalculoM.m**, que genera los cálculos para entregarlos a **BalanceM.m** y éste los entrega al programa principal.

Luego se procede con el balance de energía con el subprograma **BalanceE.m**, que calcula los cambios entálpicos de las especies involucradas, iterando con diferentes valores de temperatura final hasta que la sumatoria de entalpías es 0.

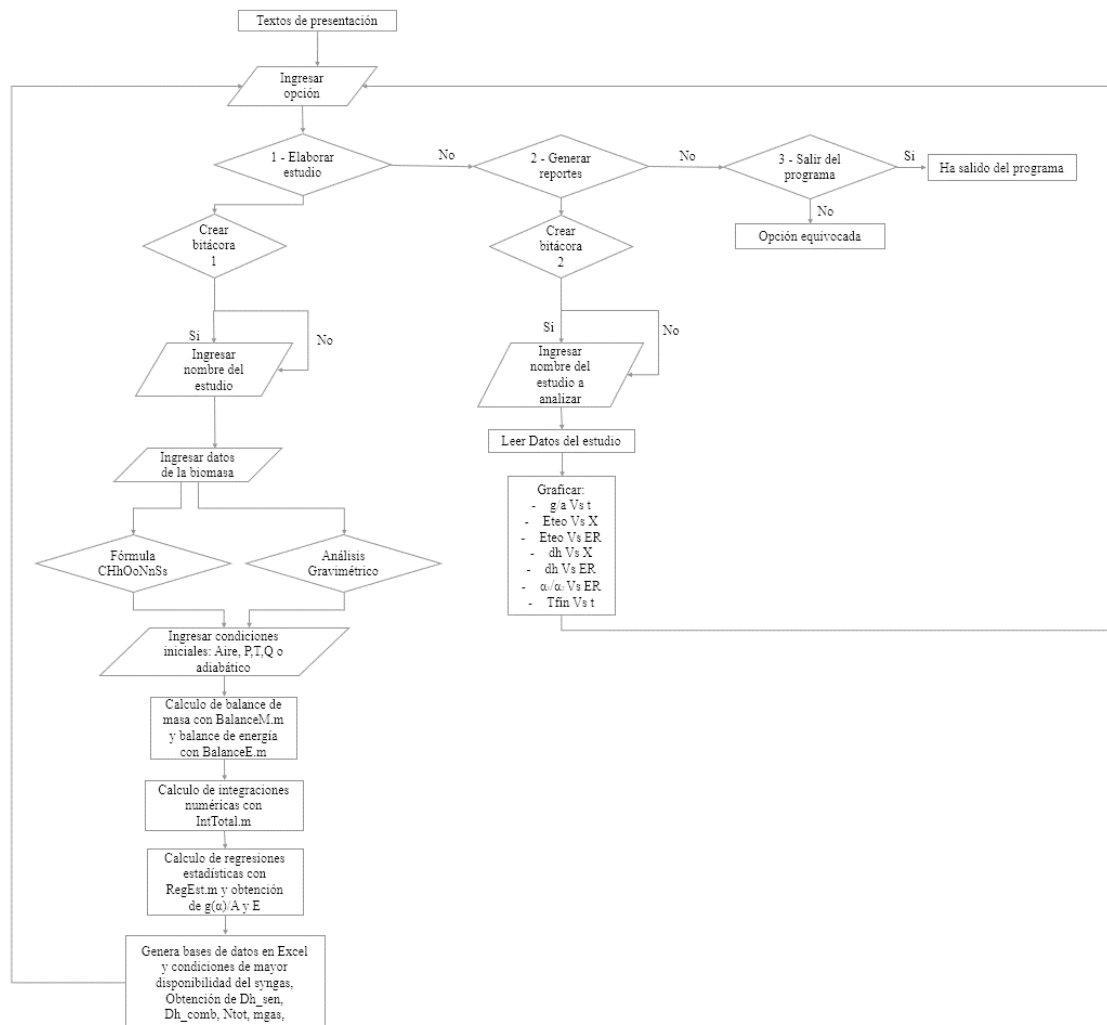
Posteriormente, a partir del subprograma **IntTotal.m**, se resuelven las integraciones numéricas, y a partir del subprograma **RegEst.m**, las regresiones estadísticas, y con los resultados se calcula $g(\alpha)/A$ y la energía de activación teórica E .

Inmediatamente, el programa reporta las condiciones de mayor disponibilidad energética en el gas de salida. Con toda la colección de datos calculados hasta el momento, el programa principal conforma 2 bases de datos que guarda en un documento de Excel, en la Hoja 1 y Hoja 2, y con el nombre del caso de estudio dado por el usuario. En la Hoja 1, se reportan los siguientes datos: avance de las reacciones α , razón de equivalencia ER , cantidad de vapor de agua X , rata de calentamiento β , energía de activación estimativa E , temperatura final T_{fin} , fracción r , aire estequiométrico a , aire actual a_a , cantidad de agua ca , las fracciones molares nH_2 , nCH_4 , nCO , nCO_2 , nH_2O , nH_2S , nO_2 , nN_2 , moles totales $nTot$, valor de H , valor de I , tiempo t , valor de la función $g(\alpha)/A$, energía de activación teórica calculada E_{teo} , masa del gas $mgas$, entalpía sensible $dhsen$, entalpía de combustión dhc , contenido energético total (sensible y de combustión) por unidad de masa J/gr, y entalpía de

combustión a condiciones estándar de presión y temperatura ambiente por metro cúbico *dhc* SAPT kJ/m³. En la Hoja 2, se reportan las energías de Gibbs estándares y a temperatura final del carbono, hidrógeno y oxígeno, y las constantes de equilibrio del carbono, hidrógeno y oxígeno. Estas bases de datos tienen por objetivo servir al usuario en futuros análisis estadísticos y energéticos.

Por último, el programa regresa al menú principal, en donde el usuario tiene la opción de generar los reportes del estudio, lo cual genera las funciones de correlación lineal y correspondientes gráficas para $g(\alpha)/A$ vs *tiempo*, E_{teo} vs X , E_{teo} vs ER , J/gr vs X , J/gr vs ER , r vs α , r vs ER y T_{fin} vs *tiempo*.

Figura 4-1 Diagrama de flujo del programa.



4.5. Uso del programa para la caracterización del gas obtenido

Concluido el proceso de programación, se procedió a implementarlo para la simulación del proceso de gasificación aplicado a las cascarillas de café y de Sacha Inchi. Los datos con los que se alimentó el programa son los que aparecen en las Tablas 4-2 y 4-3 respectivamente.

Los datos de la fórmula empírica de la cascarilla de café se obtuvieron del estudio de Rodríguez y Gordillo (Rodríguez, 2011) para poder comparar sus resultados con los resultados del simulador y comprobar la validez del mismo.

Los datos de la fórmula empírica de la cascarilla de Sacha Inchi se obtuvieron de los estudios realizados por la universidad EAFIT para la materia prima en cuestión. Una vez teniendo los resultados se procede a comparar el poder calorífico del gas obtenido con otros gases comerciales como el del gas licuado de petróleo GLP.

Tabla 4-2 Valores de entrada masa molecular empírica de la biomasa y condiciones iniciales para la cascarilla de café (Rodríguez, 2011).

Fórmula CHhOoNnSs	
Hidrógeno	1.746
Oxígeno	0.75
Nitrógeno	0.008
Azufre	0.0007
% de oxígeno molar en el aire	21
Condiciones iniciales	
Presión total [mmHg]	760 mmHg
Temperatura inicial de la biomasa [°C]	25
Temperatura inicial del aire [°C]	25
Temperatura inicial del vapor de agua [°C]	100
Calor añadido [J/min]	0
# de Valores para los parámetros de estimación	5

Tabla 4-3 Valores de entrada masa molecular empírica de la biomasa y condiciones iniciales para la cascarilla de Sacha Inchi.

Fórmula CHhOoNnSs	
Hidrógeno	1.622
Oxígeno	0.866
Nitrógeno	0.009
Azufre	0.0049
% de oxígeno molar en el aire	21
Condiciones iniciales	
Presión total [mmHg]	760 mmHg
Temperatura inicial de la biomasa [°C]	25
Temperatura inicial del aire [°C]	25
Temperatura inicial del vapor de agua [°C]	100
Calor añadido [J/min]	0
# de Valores para los parámetros de estimación	5

5. Resultados

En esta sección se ilustran los resultados arrojados por el programa con los parámetros de entrada anteriormente descritos.

5.1. Resultados del programa de simulación para la cascarilla de café

El programa presentó los siguientes resultados en la opción 1, “Elaborar Estudio”. La correlación lineal de la Integral I vs Temperatura [K], en la forma $I = \hat{\beta}_{0i} + \hat{\beta}_{1i} * T$ es:

Tabla 5-1 Correlación lineal de la Integral I vs Temperatura.

$\hat{\beta}_{0i}$	$\hat{\beta}_{1i}$	R_{2i}	R_{2i} ajustada
-296.45159758	0.972467445968	0.99833858575	0.998337397328

La correlación lineal de Energía de Activación Teórica E_{teo} vs X, en la forma

$$E_{teo} = \hat{\beta}_{0e} + \hat{\beta}_{1e} * X, \text{ es:}$$

Tabla 5-2 Correlación lineal de Energía de Activación Teórica (E_{teo}) vs X.

$\hat{\beta}_{0e}$	$\hat{\beta}_{1e}$	R_{2e}	R_{2e} ajustada
221.312529623	-161.500148664	0.718961711893	0.718760683074

Para ambas regresiones lineales, se observa que el coeficiente de correlación es bastante aceptable, lo que otorga confianza a los resultados obtenidos. Se obtuvo la correlación para el valor estimado de la energía de activación teórica para la cascarilla de café, resultando con un valor de 220.31 J/mol para $X=0$, el cual concuerda con (Rodriguez, 2011) que reporta un valor de 221 J/mol. Teniendo validados estos datos se procede entonces al análisis de los resultados obtenidos para la cascarilla de Sacha Inchi.

5.2. Resultados del programa de simulación para la cascarilla Sacha Inchi

El programa presentó los siguientes resultados en la opción 1, “Elaborar Estudio”.

La correlación lineal de la Integral I vs Temperatura [K], en la forma $I = \hat{\beta}_{0i} + \hat{\beta}_{1i} * T$ es:

Tabla 5-3 Correlación lineal de la Integral I vs Temperatura.

$\hat{\beta}_{0i}$	$\hat{\beta}_{1i}$	R_{2i}	R_{2i} ajustada
-297.687085839	0.97404472149	0.998418296078	0.99841718455

La correlación lineal de Energía de Activación Teórica E_{teo} vs X , en la forma

$E_{teo} = \hat{\beta}_{0e} + \hat{\beta}_{1e} * X$, es:

Tabla 5-4 Correlación lineal de Energía de Activación Teórica (E_{teo}) vs X .

$\hat{\beta}_{0e}$	$\hat{\beta}_{1e}$	R_{2e}	R_{2e} ajustada
223.08911871	-160.36261312	0.774445206953	0.774286700423

Para ambas regresiones lineales, se observa que el coeficiente de correlación es bastante aceptable, lo que otorga confianza a los resultados obtenidos. En la siguiente Tabla 5-3 se muestran los resultados que el programa despliega en pantalla, y corresponden a alfa α , razón de equivalencia ER , cantidad de vapor de agua X , temperatura final T [K], cambio de entalpía debido al calor sensible dh_{sen} [J/gr], cambio de entalpía de combustión (poder calorífico inferior) dh_{comb} [J/gr], y el contenido energético total J/gr totales, que es la suma del calor sensible y el calor de combustión. La tabla de resultados que presenta el programa corresponde a un resumen de la base de datos que el programa guarda en un archivo de Excel, cuyo tamaño depende del número de parámetros de estimación elegido por el usuario, que en este caso fue 5, lo que da una base de datos de $5^5 = 3125$ registros. Sin embargo, la base de

datos con la que trabaja el programa siempre es de menor tamaño, pues el programa ignora las condiciones que generan temperaturas finales menores a 215°C.

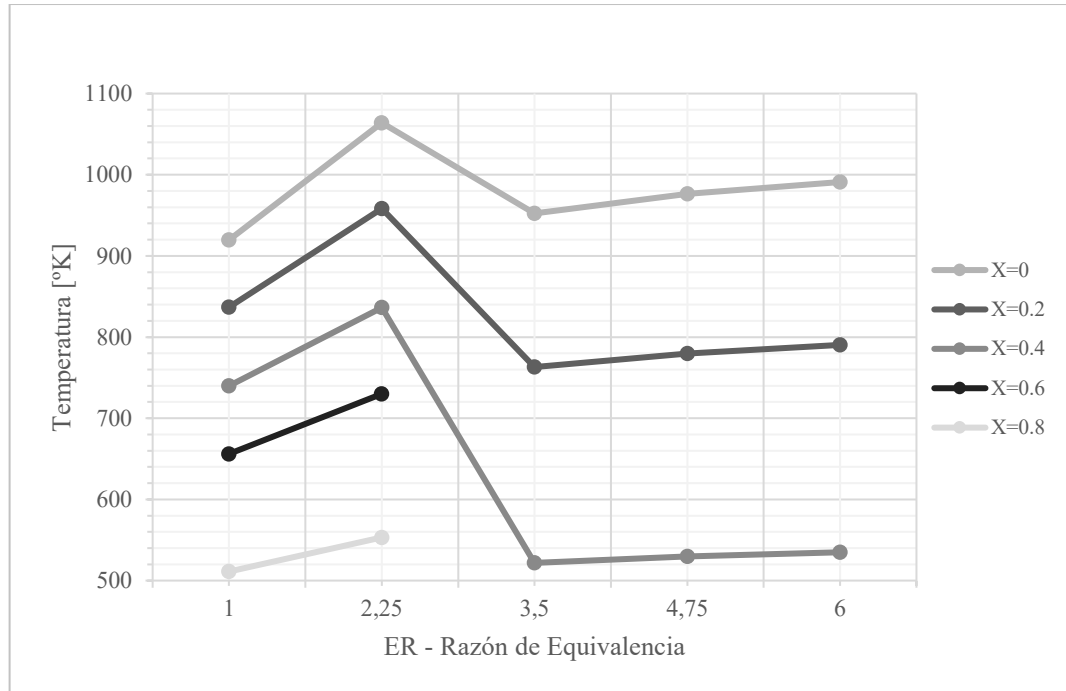
Tabla 5-5 Contenido energético del gas de salida a diferentes condiciones.

Alfa - Estado de la Reacción	ER - Razón de Equivalencia	X - Cantidad de Vapor	Temperatura [K]	Entalpía Sensible [J/gr]	Entalpía de Combustión [J/gr]	Entalpía Total [J/gr]
1	<u>1</u>	<u>0</u>	919.6451	-911.47607	-1036.8451	<u>-1948.3211</u>
1	<u>1</u>	<u>0</u>	969.0164	-993.74667	<u>-1004.4931</u>	-1998.2398
1	1	0.2	880.2774	-856.58068	-1337.7613	-2194.342
1	1	0.4	777.2806	-699.29791	-1719.9065	-2419.2044
1	1	0.6	656.0986	-517.12291	-2162.5321	-2679.655
1	<u>1</u>	<u>0.8</u>	<u>511.1988</u>	<u>-303.63814</u>	-2681.2297	-2984.8678
1	<u>2.25</u>	<u>0</u>	<u>1122.5926</u>	<u>-1277.3488</u>	-1291.1622	-2568.511
1	2.25	0.2	1009.6331	-1095.5801	-1711.0177	-2806.5978
1	2.25	0.4	880.19	-889.3585	-2187.3556	-3076.7141
1	2.25	0.6	729.9845	-653.39344	-2732.3955	-3385.789
1	2.25	0.8	553.1892	-380.7503	-3362.156	-3742.9063
1	3.5	0	1029.4628	-1088.2619	-1930.2121	-3018.474
1	3.5	0.2	834.0059	-766.52706	-2602.7752	-3369.3023
1	3.5	0.4	586.9536	-387.55381	-3394.9907	-3782.5445
1	4.75	0	1055.7675	-1136.0337	-2014.943	-3150.9767
1	4.75	0.2	852.8101	-799.2555	-2713.9063	-3513.1618
1	4.75	0.4	597.0565	-403.5548	-3535.1602	-3938.715
1	6	0	1072.0825	-1165.8881	-2067.895	-3233.7831
1	6	0.2	864.437	-819.67079	-2783.2273	-3602.8981
1	<u>6</u>	<u>0.4</u>	603.2886	-413.51401	<u>-3622.4028</u>	<u>-4035.9168</u>

La Tabla 5-3 presenta el contenido energético del gas de salida, para alfa igual a 1, ya que sólo son de interés los resultados de una reacción completa. Se observa que la mayor temperatura final tiene un valor de 1122.5926 K y ocurre cuando ER=2.25 y X=0, y la mínima tiene un valor de 511.1988 K con ER=1 y X=0.8. La mayor entalpía sensible (o menor, o más negativa, si se sigue la convención de signos como se muestra en la tabla) tiene un valor de -1277.3488 J/gr y ocurre con ER=2.25 y X=0, y la mínima (o mayor o menos negativa) tiene un valor de -303.63814 J/gr con ER=1 y X=0.8. La mayor entalpía de combustión tiene un valor de -3622.4028 J/gr y ocurre con ER=6 y X=0.4, y la mínima tiene un valor de -1004.4931 J/gr con ER=1 y X=0. Por último, el mayor contenido energético

total, que es la suma de las entalpías sensibles y de combustión, tiene un valor de -4035.9168 J/gr y ocurre con $ER=6$ y $X=0.4$, y el mínimo contenido energético total tiene un valor de -1948.3211 J/gr con $ER=1$ y $X=0$. Los datos presentados en la Tabla 5-3 se ilustran en las siguientes gráficas.

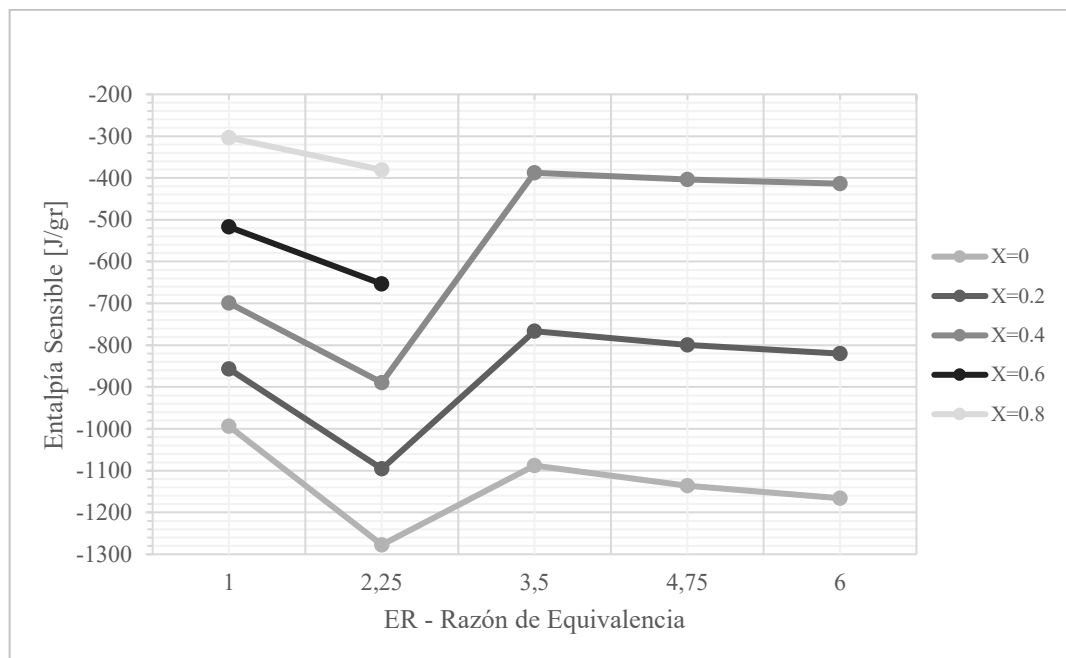
Gráfico 5-1 Temperatura final [K] vs ER para diferentes condiciones de X.



El gráfico 5-1 presenta el comportamiento de la temperatura final de los gases de salida con la variación de ER, para las diferentes condiciones de X. Para $X=0.6$ y $X=0.8$, sólo existen puntos graficados hasta $ER=2.25$, ya que después de dicho punto, las temperaturas caen por debajo del valor mínimo establecido, y, por lo tanto, se ignoran. Se aprecia que la temperatura final es máxima cuando $X=0$, y que la adición de vapor (aumento de X) tiende a disminuirla. Se observa que el aumento de ER provoca primero un aumento de la temperatura, hasta $ER=2.25$, donde ocurre la temperatura máxima para todas las X. Después de este punto, la temperatura disminuye hasta un nuevo valor mínimo relativo en $ER=3.5$, y el descenso de temperatura es más pronunciado cuando aumenta X. Después de $ER=3.5$, las

temperaturas vuelven a aumentar, pero con una pendiente mucho menor. La adición de vapor de agua, aunque añade energía al sistema, tiende a disminuir la temperatura final del mismo, ya que además de añadir materia que consume energía para elevar su temperatura, las reacciones en las que interviene el vapor de agua son altamente endotérmicas. Por otra parte, el aumento de ER significa que menos aire (oxígeno y nitrógeno) está entrando al sistema, y la deficiencia de oxígeno tiende a inhibir las reacciones exotérmicas de combustión, pero el nitrógeno no reacciona y sólo absorbe energía, por lo que, al disminuir el nitrógeno, las reacciones exotérmicas pueden mantener y elevar la temperatura más fácilmente.

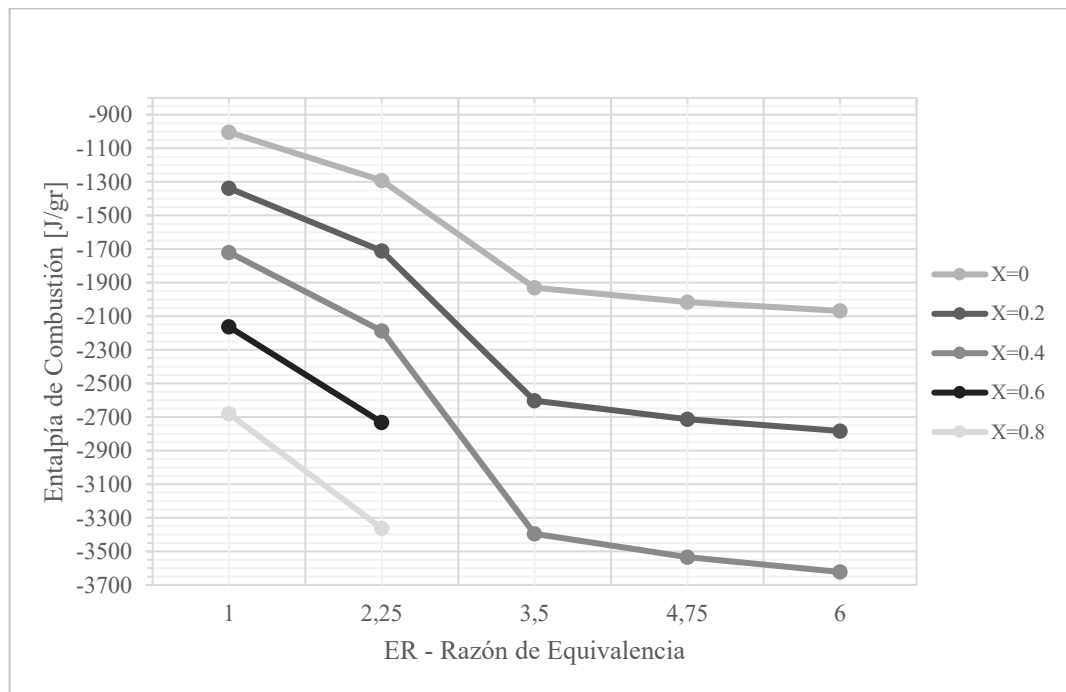
Gráfico 5-2 Entalpía sensible [J/gr] vs ER para diferentes condiciones de X.



El gráfico 5-2 presenta el comportamiento de la entalpía sensible de los gases de salida con la variación de ER, para las diferentes condiciones de X. Se observa que la condición de X=0 es la que ofrece los valores absolutos más grandes de entalpía sensible, ya que X=0 también es la condición de máxima temperatura final, de la cual la entalpía sensible es una función. De hecho, esta gráfica tiene el mismo comportamiento que la gráfica de temperatura del gráfico 5-1, pero de manera invertida, ya que las temperaturas son positivas y las entalpías son negativas. El vapor que se añade al sistema, contribuye con su entalpía

sensible a la entalpía sensible del sistema, lo que provoca un primer aumento de entalpía y temperatura de $ER=1$ hasta $ER=2.25$, donde ocurre el máximo valor absoluto de entalpía, pero después de este punto, el vapor consume energía para las reacciones endotérmicas en las que interviene, lo cual disminuye bruscamente la entalpía y la temperatura hasta $ER=3.5$, para después incrementar nuevamente con una pendiente menos pronunciada. Por otra parte, el aumento de ER disminuye la cantidad de aire que entra en el sistema, lo que en un principio favorece al crecimiento del valor absoluto de la entalpía, ya que existe menos cantidad de nitrógeno que calentar, pero después de $ER=2.25$, la deficiencia de oxígeno se hace notar, al inhibir las reacciones de combustión y disminuyendo la entalpía sensible del sistema hasta $ER=3.5$, a partir de donde el valor absoluto de la entalpía vuelve a incrementarse con una menor pendiente, ayudado por la ausencia de nitrógeno.

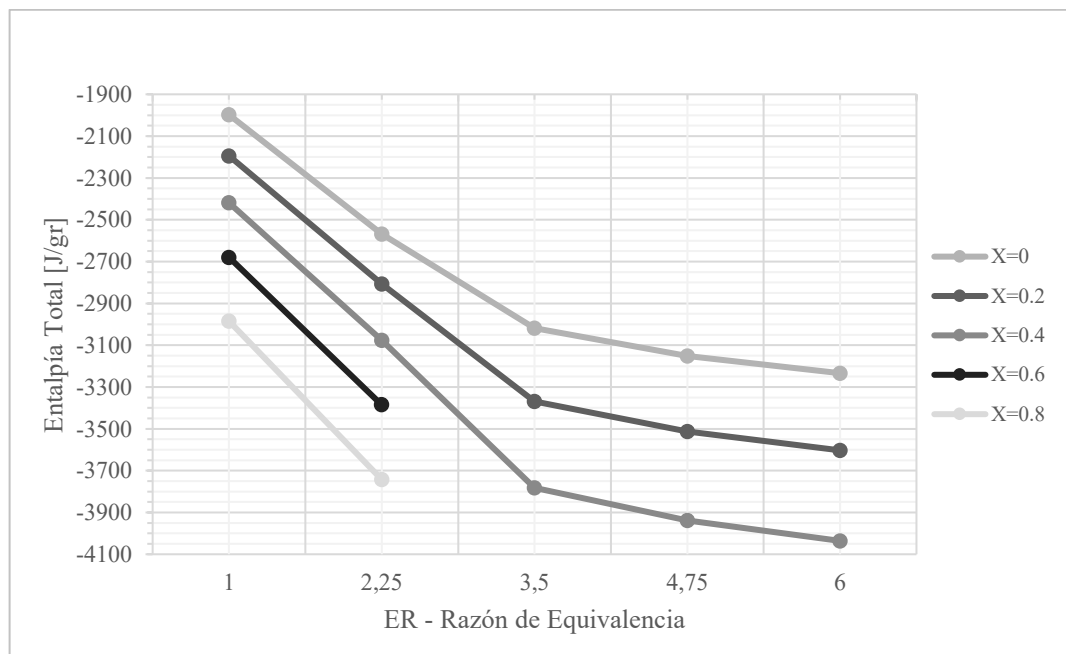
Gráfico 5-3 Entalpía de combustión [J/gr] vs ER para diferentes condiciones de X .



El gráfico 5-3 presenta el comportamiento de la entalpía de combustión de los gases de salida con la variación de ER , para las diferentes condiciones de X . Se observa que el aumento de X provoca el aumento de los valores absolutos de la entalpía de combustión, por

lo que el valor máximo debería encontrarse con $X=0.8$, sin embargo, el aumento de X también disminuye la temperatura de los gases, al grado de que para $X=0.6$ y $X=0.8$, sólo existen datos hasta $ER=2.25$, después de este punto, la temperatura disminuye por debajo de la temperatura mínima permitida. Entonces, el máximo valor absoluto de entalpía de combustión cae sobre la línea de $X=0.4$. Aumentar X representa aumentar la cantidad de vapor de agua en el sistema, y el vapor de agua es la materia prima para la mayor parte de la producción de hidrógeno y metano, mediante reacciones endotérmicas que disminuyen la entalpía sensible y la empaquetan en forma de entalpía de combustión, que es energía potencial química. Por otra parte, aumentar ER significa la disminución de la cantidad de oxígeno y nitrógeno en el sistema. Al disminuir el oxígeno, se inhiben las reacciones oxidantes exotérmicas y se favorecen las reacciones reductoras endotérmicas, lo que ayuda a almacenar más energía potencial química en forma de entalpía de combustión de las especies combustibles del gas de salida.

Gráfico 5-4 Contenido energético total [J/gr] vs ER para diferentes condiciones de X .



El gráfico 5-4 presenta el comportamiento del contenido energético total de los gases de salida, que es la suma de entalpías sensibles y entalpías de combustión, con la variación de ER , para las diferentes condiciones de X . Se observa que la entalpía de combustión domina

a la entalpía sensible, pues la gráfica del contenido energético total sigue más fielmente a la gráfica de la entalpía de combustión que a la gráfica de la entalpía sensible. Además, el punto de máxima entalpía de combustión resulta ser el mismo que el punto de máximo contenido energético total, con ER=6 y X=0.4. Las características del gas obtenido en el máximo punto de energía se muestran en la siguiente Tabla.

Tabla 5-6 Características del gas de salida en el punto de máxima energía.

ER	x	T [k]	nTot [mol]	mmgas [gr/mol]	dhsen [J/gr]	dhcom [J/gr]	dhTot [J/gr]
6	0.4	603.2886	4.03290446	29.4028572	-413.51401	-3622.4028	-4035.9168
nH2 [mol]	nCH4 [mol]	nCO [mol]	nCO2 [mol]	nH2O [mol]	nH2S [mol]	nO2 [mol]	nN2 [mol]
0.34877695	0.43005789	4.3006E-17	0.56994211	5.5311E-13	0.00210728	0.24489646	2.43712377

El siguiente paso es la generación de los reportes con el código contenido en la opción 2 del programa, “Reportes del estudio”, presenta la información concerniente a las correlaciones lineales obtenidas de las cuales se procederá a comentar una a una.

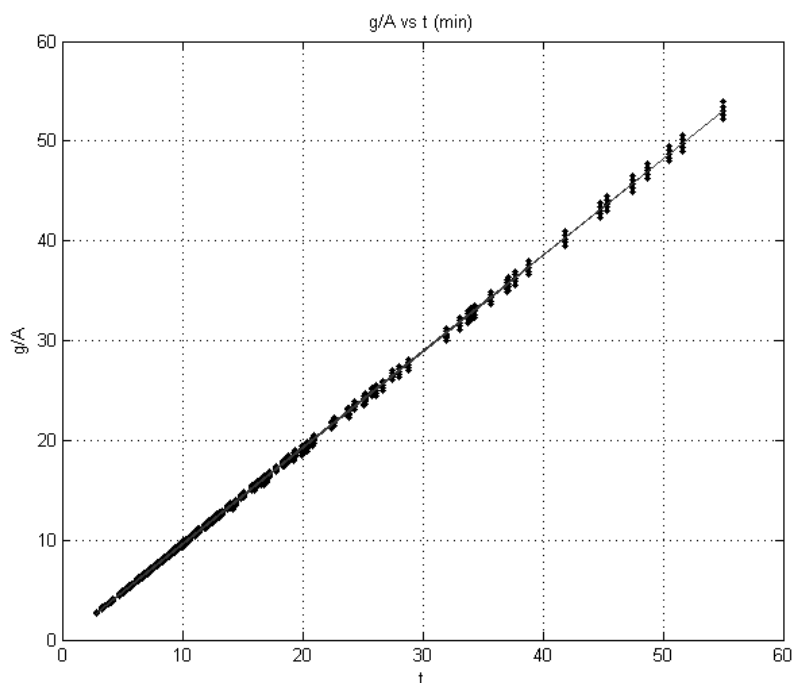
La correlación lineal $g(\alpha)/A$ vs Tiempo (min) en la forma $\frac{g(\alpha)}{A} = \hat{\beta}_{0A} + \hat{\beta}_{1A} * t$ es:

Tabla 5-7 Coeficientes de Correlación lineal de $g(\alpha)/A$ vs tiempo.

$\hat{\beta}_{0A}$	$\hat{\beta}_{1A}$	R_2	R_{2adj}
-0.0563933831918	0.964703726628	0.999556995159	0.999556683841

Es necesario tener en cuenta que la correlación directa está otorgando el comportamiento total y mezclado de combustión, pirólisis y gasificación de los reactivos. El hecho de que la gráfica sea una línea recta, implica que el avance de la reacción tiene una dependencia lineal con el tiempo y la reacción global es de orden 0 y no depende de la concentración de los reactivos.

Gráfico 5-5 Correlación lineal de $g(a)/A$ vs tiempo.



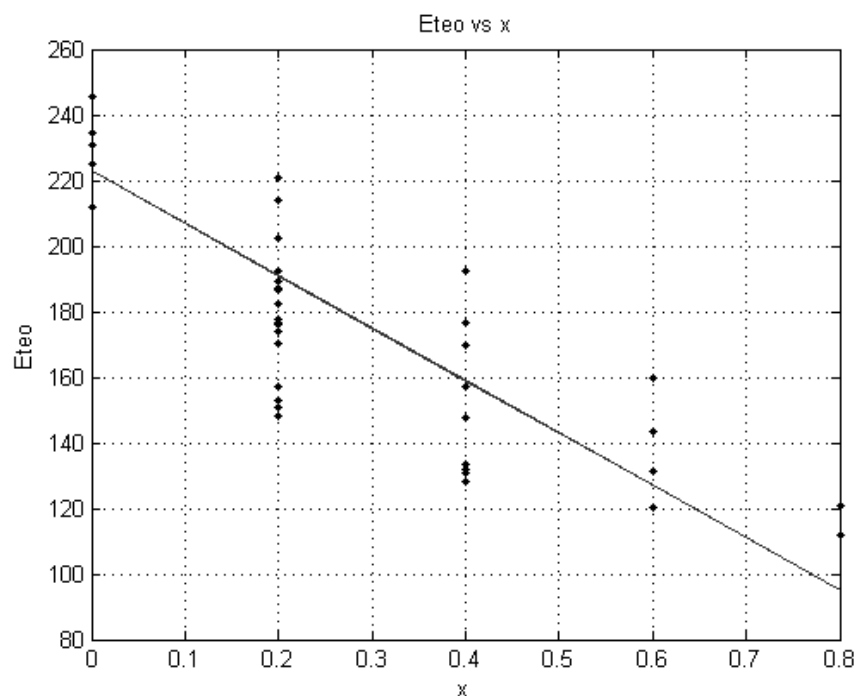
La correlación lineal Eteo vs x en la forma $E_{teo} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 * x$ es:

Tabla 5-8 Coeficientes de Correlación lineal de Eteo vs x.

$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	R_2	R_{2adj}
223.089118711	160.36261312	-0.774445206953	0.774286700423

Se observa que el aumento de X tiende a disminuir la energía de activación teórica necesaria para la reacción global, ya que el vapor inyecta entalpía sensible al sistema.

Gráfico 5-6 Correlación lineal de E_{teo} vs x .



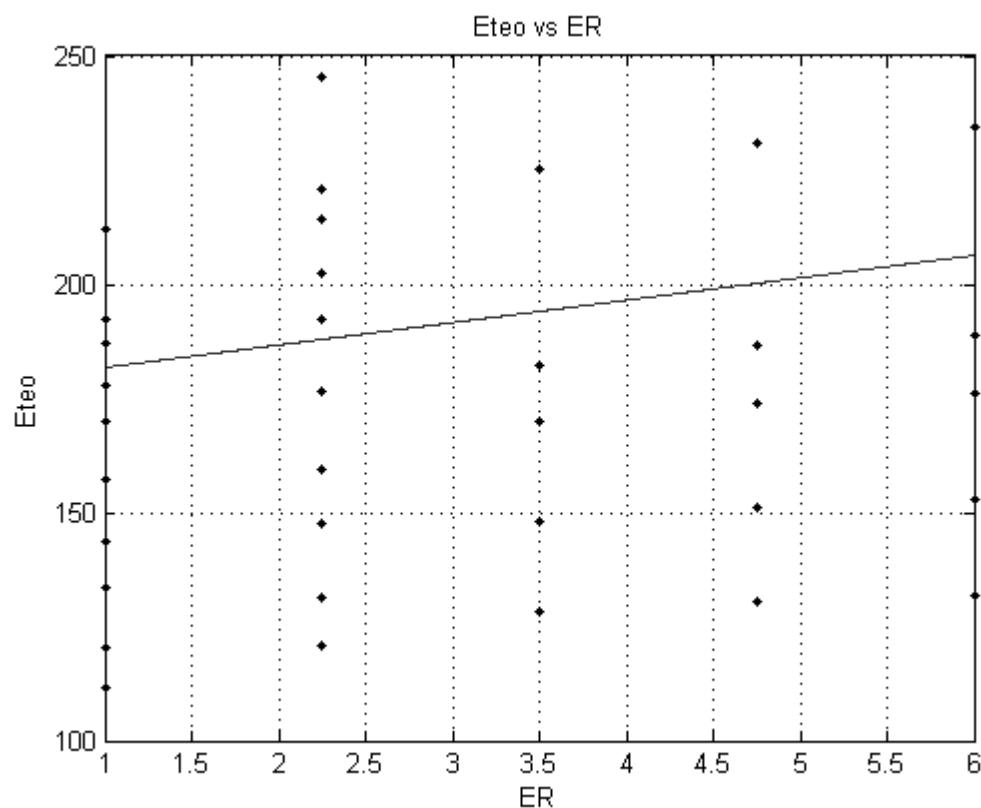
La correlación lineal Eteo vs ER en la forma $E_{teo} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 * ER$ es:

Tabla 5-9 Coeficientes de Correlación lineal de Eteo vs ER.

$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	R_2	R_{2adj}
176.765286111	4.95180629306	0.0485419818795	0.0478733536165

Se observa que el aumento de ER tiende a aumentar ligeramente la energía de activación teórica necesaria para la reacción global, ya que el aumento de ER significa menor cantidad de oxígeno disponible para las reacciones de combustión, que son las que otorgan la energía necesaria para las reacciones de reducción.

Gráfico 5-7 Correlación lineal de E_{teo} vs ER.



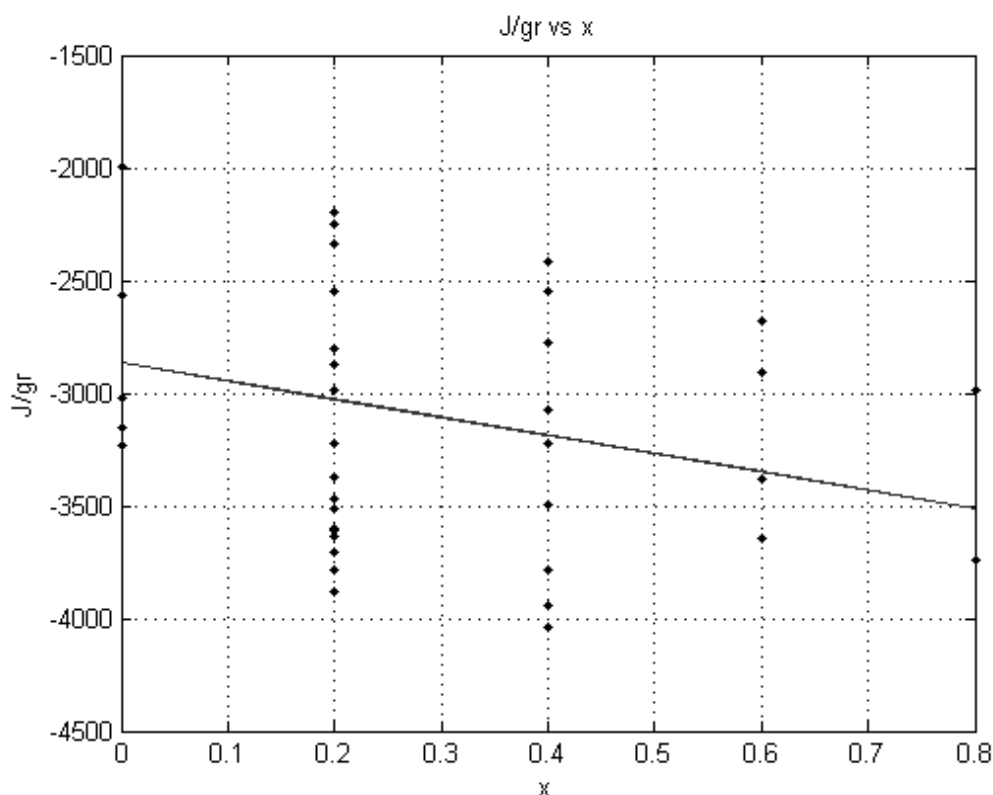
La correlación lineal J/gr vs x en la forma $J/gr = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 * x$ es:

Tabla 5-10 Coeficientes de Correlación lineal de J/gr vs x.

$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	R_2	R_{2adj}
-2867.543224	-803.197243878	0.105386483544	0.104757802225

Se observa que el aumento de X tiende a incrementar el valor absoluto del contenido energético total de los gases de salida, ya que el vapor de agua incrementa la cantidad de hidrógeno disponible para la formación de hidrógeno molecular y metano en los productos, y la cantidad de oxígeno disponible para las reacciones exotérmicas de oxidación.

Gráfico 5-8 Correlación lineal de J/gr vs x .



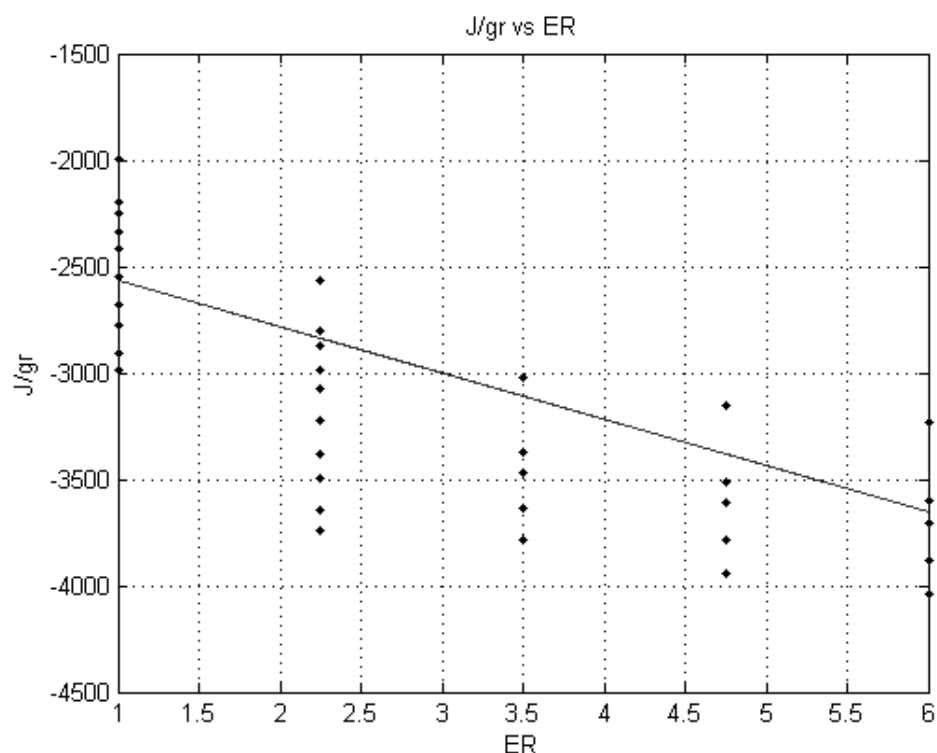
La correlación lineal J/gr vs ER en la forma $J/gr = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 * ER$ es:

Tabla 5-11 Coeficientes de Correlación lineal de J/gr vs ER .

$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	R_2	R_{2adj}
-2343.5300856	-218.666206618	0.513463525073	0.513121616096

Se observa que el aumento de ER tiende a aumentar el valor absoluto del contenido energético total de los gases de salida, ya que, al aumentar ER , disminuye el contenido de aire en el sistema, lo que significa que existe menor cantidad de nitrógeno que absorba energía para elevar su temperatura, y que se favorezcan las reacciones endotérmicas de reducción que empaquetan energía en forma de entalpía de combustión.

Gráfico 5-9 Correlación lineal de J/gr vs ER .



La correlación lineal r vs α en la forma $r = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 * \alpha$, con $r = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}$ es:

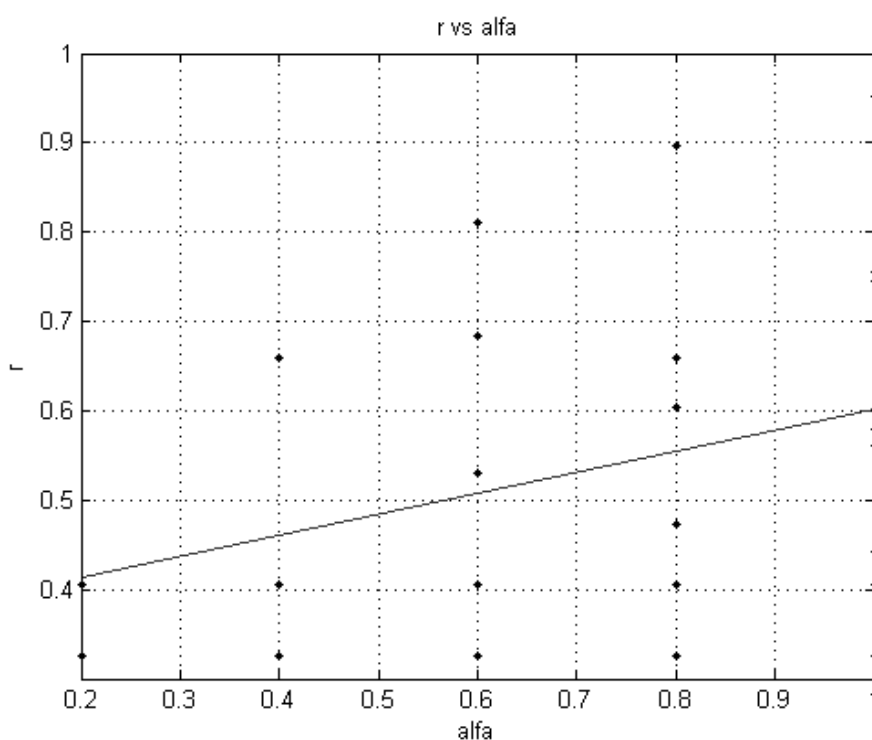
Tabla 5-12 Coeficientes de Correlación lineal de r vs α .

$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	R_2	R_{2adj}
0.366585255272	0.236235233377	0.114452512438	0.113830202187

Se observa que el aumento de alfa tiende a aumentar el valor de r . Se debe recordar que r representa la relación $\frac{\alpha_2}{\alpha_1}$, el avance de la reacción en la ecuación (4-2) entre el avance de la reacción en la ecuación (4-1), y α representa el avance global de ambas reacciones. Por lo tanto, de la gráfica se deduce que con el avance de la reacción global de combustión-gasificación, la reacción de gasificación en la ecuación (4-2) crece con respecto a la reacción en ecuación (4-1), es decir, mientras más avance la reacción global, más se lleva a cabo

gasificación y menos combustión. Sin embargo, el avance de la reacción de combustión tiende a ser mayor que el avance de la reacción de gasificación, ya que es la combustión la que entrega la energía necesaria para la gasificación. En la gráfica se aprecia sólo un punto en donde $r > 1$, y corresponde a $X=0.8$, la máxima cantidad de vapor considerado, ya que, como se discutió anteriormente, la adición de vapor alienta las reacciones endotérmicas de gasificación.

Gráfico 5-10 Correlación lineal de r vs α .



La correlación lineal r vs ER en la forma $r = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 * ER$, con $r = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}$ es:

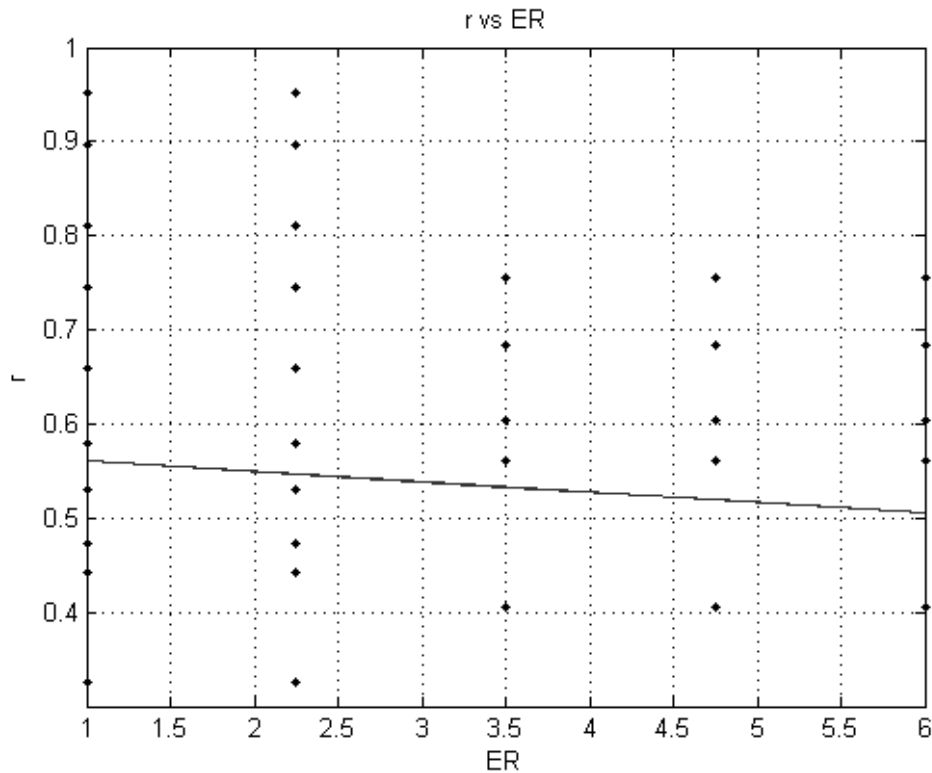
Tabla 5-13 Coeficientes de Correlación lineal de r vs ER .

$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	R_2	R_{2adj}
0.571500490545	-0.011001563816	0.0116056061138	0.01091102115

Se observa que el aumento del valor de ER tiende a inhibir ligeramente a r , es decir, provoca que la reacción de gasificación en la ecuación 4-2 pierda terreno en beneficio de la

reacción de combustión en la ecuación 4-1. Parece contradictorio que al disminuir la cantidad de aire al aumentar el valor de ER , beneficie a las reacciones de combustión y perjudique a las reacciones de gasificación, pero se debe recordar que $ER=a/a_a$, donde a representa la cantidad de aire estequiométrico en la reacción de combustión de la Ecuación 4-1, y a_a representa la cantidad de aire actual o real que interviene en la reacción de gasificación de la ecuación 4-2, por lo tanto, el aumento en ER sólo significa la disminución del aire para la reacción de gasificación, mientras que el aire para la reacción de combustión permanece constante, pues es una cantidad estequiométrica. De esta forma, al aumentar ER , aumenta la resistencia al avance de la reacción de gasificación, ya que disminuye el oxígeno disponible para las reacciones elementales exotérmicas de combustión en la ecuación 4-2, que contribuyen con una fracción de la energía necesaria para las reacciones endotérmicas de la misma reacción. Aun así, se debe hacer notar que la disminución de r debida a ER es muy pequeña, como indica el valor b_1 que representa la pendiente de la recta.

Gráfico 5-11 Correlación lineal de r vs ER .



5.3. Comparación del poder calorífico del gas obtenido con el de gases industriales comerciales

En la siguiente tabla se listan las principales propiedades energéticas (entalpías) del gas de síntesis obtenido sin adición de vapor y bajo varias condiciones de adición de vapor de agua x.

Tabla 5-14 propiedades energéticas del gas de síntesis de sachá Inchi con y sin adición de vapor de agua.

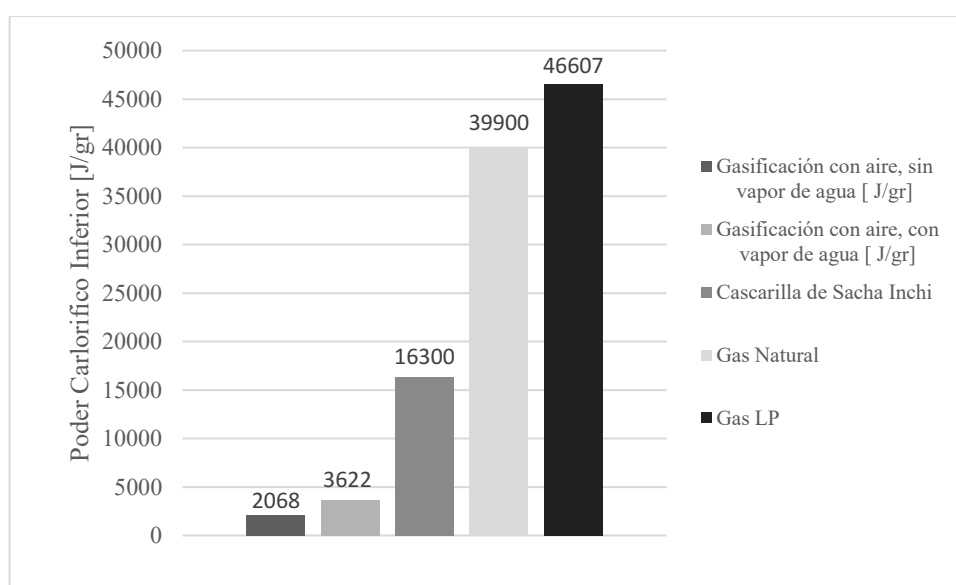
Gasificación con aire, sin vapor de agua		
Máxima entalpía sensible	ER	X
-1277.3488 J/gr	2.25	0
Máxima entalpía de combustión	ER	X
-2067.895 J/gr	6	0
Máximo contenido energético total	ER	X
-3233.7831 J/gr	6	0
Gasificación con aire, con vapor de agua		
Máxima entalpía sensible	ER	X
-1095.5801 J/gr	2.25	0.2
Máxima entalpía de combustión	ER	X
-3622.4028 J/gr	6	0.4
Máximo contenido energético total	ER	X
-4035.9168 J/gr	6	0.4

Cabe anotar que la entalpía de combustión de los gases representa el poder calorífico inferior, ya que las entalpías de reacción empleadas para su cálculo toman en cuenta al agua en estado gaseoso. De la literatura revisada, se reportan los poderes caloríficos inferiores PCI del gas licuado de petróleo GLP y el gas natural GN, que son los combustibles más ampliamente usados a nivel industrial y comercial, también se consigna como valor de referencia el dato del PCI de la cascarilla de Sachá Inchi en combustión directa.

Tabla 5-15 propiedades energéticas de distintos gases como referencia comparativa.

Combustible	PCI	Fuente
Cascarilla de Sacha Inchi	16300 J/gr	Experimentos realizados por EAFIT (ver Anexos)
Gas LP	46607 J/gr	(Boundy, 2011)
Gas Natural	39900 J/gr	(Biblioteca.uns.edu.pe)

Gráfico 5-12 Comparación poderes caloríficos inferiores GN, GLP, Cascarilla Vs “syngas” Sacha Inchi.



En la gráfica se aprecia claramente que el poder calorífico del gas producido en cualquier modalidad es inferior al poder calorífico del gas LP y de la cascarilla de café en combustión directa. Al comparar el poder calorífico del gas obtenido de la gasificación de cascarilla de café con el poder calorífico de la cascarilla de café, se puede apreciar que el proceso de gasificación en realidad disminuyó el contenido energético de la materia prima, lo que de hecho es congruente con las leyes de la termodinámica, ya que en cualquier transformación de energía, la segunda ley de la termodinámica indica que una parte de la energía se pierde irremediamente debido a las irreversibilidades inherentes al proceso.

Específicamente hablando de en comparación a la combustión directa de cascarilla podemos darnos cuenta que, en el mejor de los casos, sólo se recupera el 22.22% de la energía contenida en la materia prima, esto es para el caso de máximo contenido energético global ocurrido en $ER=6$ y $X=0.4$, si se mira esta comparación desde el punto de vista termodinámico se podría considerar el proceso de gasificación ineficiente, pero es importante anotar que la gasificación de biomasa sigue siendo una opción atractiva, ya que disminuye la cantidad de contaminantes liberados al ambiente en comparación a la combustión directa de la biomasa, además de convertir a la biomasa en un combustible más versátil, que puede ser utilizado, por ejemplo, en una máquina de combustión interna para producir energía mecánica y eléctrica. Finalmente, frente al gas LP, la biomasa es un recurso renovable y no tiene contribución neta al CO_2 presente en la atmósfera además se trata de un subproducto derivado del beneficio del fruto de Sacha Inchi por lo que generalmente termina siendo descartado como basura.

6. Conclusiones

Se elaboró un simulador numérico del proceso de gasificación pirolítica en el lenguaje de programación de Matlab, el cual se aplicó al estudio del proceso de gasificación de la cascarilla de sachá Inchi. Se obtuvo la correlación para el valor estimado de la energía de activación teórica para la cascarilla de sachá Inchi, resultando con un valor de 223.09 J/mol para $X=0$, el cual fue corroborado con la información plasmada en (Rodriguez, 2011) corriendo el programa con los datos DAF de biomasa de cascarilla de café plasmados en el artículo, los cuales reportan un valor de 221 J/mol, obteniéndose para el caso del programa realizado un valor de 221.31 J/mol. Se encontró que, para gasificación sin vapor de agua, el máximo valor de entalpía de combustión (poder calorífico inferior PCI) es de 2067.89 J/gr, y el máximo valor de contenido energético total es de 3233.78 J/gr, mientras que, para gasificación con vapor de agua, el máximo valor de entalpía de combustión es de 3622.40 J/gr, y el máximo valor de contenido energético total es de 4035.91 J/gr.

Se observó que la adición de vapor de agua, aunque añade energía al sistema, tiende a disminuir la temperatura final del mismo, ya que además de añadir materia que consume energía para elevar su temperatura, las reacciones en las que interviene el vapor de agua son altamente endotérmicas. Por otra parte, el aumento de ER significa que menos aire (oxígeno y nitrógeno) está entrando al sistema, y la deficiencia de oxígeno tiende a inhibir las reacciones exotérmicas de combustión, pero el nitrógeno no reacciona y sólo absorbe energía, por lo que, al disminuir el nitrógeno, las reacciones exotérmicas pueden mantener y elevar la temperatura más fácilmente.

Se observó que el vapor que se añade al sistema, contribuye con su entalpía sensible a la entalpía sensible del sistema, lo que provoca un primer aumento de entalpía y temperatura, pero después el vapor consume energía para las reacciones endotérmicas en las que interviene, lo cual disminuye bruscamente la entalpía y la temperatura, para después incrementar nuevamente con una pendiente menos pronunciada. Por otra parte, el aumento

de ER disminuye la cantidad de aire que entra en el sistema, lo que en un principio favorece al crecimiento del valor absoluto de la entalpía, ya que existe menos cantidad de nitrógeno que calentar, pero después, la deficiencia de oxígeno se hace notar, al inhibir las reacciones de combustión y disminuyendo la entalpía sensible del sistema hasta un mínimo, a partir de donde el valor absoluto de la entalpía vuelve a incrementarse con una menor pendiente, ayudado por la ausencia de nitrógeno.

Se observó que el aumento de X provoca el aumento de los valores absolutos de la entalpía de combustión. Aumentar X representa aumentar la cantidad de vapor de agua en el sistema, y el vapor de agua es la materia prima para la mayor parte de la producción de hidrógeno y metano, mediante reacciones endotérmicas que disminuyen la entalpía sensible y la empaquetan en forma de entalpía de combustión, que es energía potencial química. Por otra parte, aumentar ER significa la disminución de la cantidad de oxígeno y nitrógeno en el sistema. Al disminuir el oxígeno, se inhiben las reacciones oxidantes exotérmicas y se favorecen las reacciones reductoras endotérmicas, lo que ayuda a almacenar más energía potencial química en forma de entalpía de combustión de las especies combustibles del gas de salida.

Se observó que la entalpía de combustión domina a la entalpía sensible, pues la gráfica del contenido energético total sigue más fielmente a la gráfica de la entalpía de combustión que a la gráfica de la entalpía sensible. Además, el punto de máxima entalpía de combustión resulta ser el mismo que el punto de máximo contenido energético total, con $ER=6$ y $X=0.4$.

De los datos de cinética química que proporciona el programa, se concluye que el avance de la reacción tiene una dependencia lineal con el tiempo y la reacción global es de orden 0 y no depende de la concentración de los reactivos.

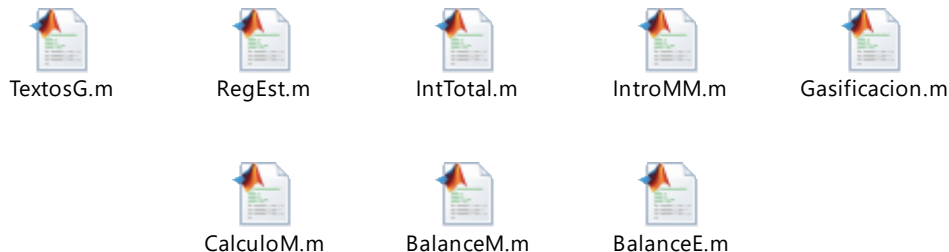
Al comparar el valor del poder calorífico del gas obtenido de la gasificación de cascarilla de café, con el valor del poder calorífico del gas LP y de la cascarilla de café como

biomasa en combustión directa, se observó que, en el mejor de los casos, sólo se recupera el 22.22% de la energía contenida en la materia prima, perdiendo la energía restante debido a las irreversibilidades térmicas del proceso.

De todo lo anterior, se concluye que el uso de gas obtenido representa una opción atractiva para usos tanto domésticos como industriales, ya que disminuye la cantidad de contaminantes liberados al ambiente en comparación a la combustión directa de la biomasa, además de convertir a la biomasa en un combustible más versátil, pues el gas obtenido se puede utilizar en una máquina de combustión interna para producir energía mecánica y eléctrica. Finalmente, frente al gas LP, la biomasa es un recurso renovable y no tiene contribución neta al CO₂ presente en la atmósfera, y es un subproducto del beneficio de la sachá Inchi, mayormente desechado como basura en la actualidad. Al final, la conveniencia del uso del gas de cascarilla de sachá Inchi, depende de las necesidades energéticas del usuario y de la disponibilidad de materia prima y recursos (combustible, biomasa y vapor).

7. Anexos

7.1. Programa principal y subprogramas (código MATLAB)



7.2. Matriz de datos termodinámicos de las especies

El archivo binario **Dh.mat** contiene una matriz de valores termodinámicos de las especies químicas involucradas en el estudio, formada por 10 columnas y 8 renglones. La columna 1 está numerada del 1 al 8, y representa el número de identificación de cada especie, quedando de la siguiente manera:

1. Hidrógeno molecular (H_2)
2. Metano (CH_4)
3. Monóxido de carbono (CO)
4. Dióxido de carbono (CO_2)
5. Agua (H_2O)
6. Sulfuro de hidrógeno (H_2S)
7. Oxígeno molecular (O_2)
8. Nitrógeno molecular (N_2)

De la columna 2 a la columna 6, se enlistan los valores de los coeficientes a , b , c , d y e , para el cálculo de C_p de cada especie, cuando el C_p es función de la temperatura en la forma:

$$C_p(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4 \quad (4-61)$$

Las unidades de C_p son J/mol-K. La columna 7 contiene las masas moleculares de las especies, con unidades g/mol. La columna 8 contiene las entalpías de formación molares estándar, $\Delta \hat{h}_f^\circ$, con unidades J/mol. La columna 9 contiene las entalpías de reacción molares estándar, $\Delta \hat{h}_r^\circ$, con unidades kJ/mol. La columna 10 presenta las energías libres de reacción molares (Gibbs) para cada especie, $\Delta \hat{G}^\circ$, con unidades kJ/mol. Todos los valores fueron tomados de las tablas presentes en el libro “Balances de materia y energía”, de (Reklaitis, 1986).

Tabla 7-1 Datos termodinámicos presentes en el archivo binario Dh.mat. El archivo contiene sólo los valores numéricos dispuestos en una matriz 8x10. De autoría propia, valores tomados de (Reklaitis, 1986).

Especie	#	a	b	c	d	e	Masa Molecular g/mol	Entalpía de formación molar estándar J/mol	Entalpías de reacción molar estándar kJ/mol	Energía libre de reacción molar (Gibbs) kJ/mol
H ₂	1	17.6386	0.0670055	-0.000131485	1.05883E-07	-2.91803E-11	2.01594	0.00000	0.00000000	0.00000000
CH ₄	2	38.387	-0.0736639	0.000290981	-2.63849E-07	8.00679E-11	16.04303	-74874.40950	-74.87440950	-50.81197000
CO	3	29.0063	0.00249235	-0.000018644	4.79892E-08	-2.87266E-11	28.01055	-110562.91235	-110.56291235	-137.3174654
CO ₂	4	19.0223	0.0796291	-7.37067E-05	3.74572E-08	-8.13304E-12	44.00995	-393653.80890	-393.65380890	-394.52439290
H ₂ O	5	34.0471	-0.00965064	3.29983E-05	-2.04467E-08	4.30228E-12	18.01534	-241913.11045	241.91311045	228.67772235
H ₂ S	6	34.5234	-0.0176481	6.76664E-05	-5.32454E-08	1.40695E-11	34.07994	-20153.18250	-20.15318250	-33.03196600
O ₂	7	29.8832	-0.0113842	4.33779E-05	-3.70082E-08	1.01006E-11	31.9988	0.00000	0.00000000	0.00000000
N ₂	8	29.4119	-0.00300681	5.45064E-05	5.13186E-09	-4.25308E-12	28.0134	0.00000	0.00000000	0.00000000

7.3. Análisis DAF para la Sacha Inchi



20140602-Balances
de masa RG.xlsx

7.4. Bitácoras del programa para cascarilla de Sacha Inchi y cascarilla de café



Café.xlsx



Bitacora2-Café.txt



Bitacora1-Café.txt



Bitacora2-Sachainchi.txt



Bitacora1-Sachainchi.txt



Sachainchi.xlsx

Bibliografía

- Amell Arrieta, A. C. (2007). *Manejo de combustibles 1ra Ed.* Medellín, Colombia: Área Metropolitana del Valle de Aburrá.: (Universidad Nacional de Colombia, Universidad Pontificia Bolivariana, & Universidad de Antioquía, Eds.) .
- Atnaw, S. M. (2009). Modeling and Simulation Study of Downdraft Gasifier Using Oil-Palm Fronds. *Proceedings of ICEE 2009 3rd International Conference on Energy and Environment*, 284-289.
- B.V. Babu, P. N. (2006). Modeling and simulation of reduction zone of downdraft biomass gasifier: Effect of char reactivity factor. *Energy Conversion and Management* 47, 2602–2611.
- Balat, M. (2008). Hydrogen-Rich Gas Production from Biomass via Pyrolysis and Gasification Processes and Effects of Catalyst on Hydrogen Yield. *Energy Sources. Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 30, 552–564.
- Basu, P. (2013). *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory.* (Academic Press, Ed.) (2dn Edition). 525 B Street, Suite 1800, San Diego, CA 92101-4495, USA.: Elsevier Inc.
- Biblioteca.uns.edu.pe. (s.f.). *tablas_tema_3.pdf*. Obtenido de http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/tablas_tema_3.pdf
- Biomass Users Network (BUN-CA). (2002). *Manuales sobre energía renovable: Biomasa/ Biomass*. Obtenido de <http://www.enersilva.org/libros/manual%20biomasa.pdf>
- Bomprezzi, L. P. (2002). The heating value of gas obtained from biomass gasification: a new method for its calculation or prediction. *Journal of Power and Energy*, 216(6), 447-453.
- Boundy, B. D. (2011). *Biomass Energy Data Book 4th Ed.* Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, Ed.
- Castellan, G. W. (1987). *Fisicoquímica (Tercera ed)*. Reading, Massachusetts, E.U.A.: Addison-Wesley Publishing Company.

- Çengel, Y. A. (2006). *Thermodynamics; An Engineering Approach (5ta ed.)*. Boston, Massachusetts: McGraw-Hill College.
- CHIRINOS, O. E. (2009). *Exportación de sachá inchi al mercado de Estados Unidos*.
Obtenido de
http://www.esan.edu.pe/publicaciones/Descargue_el%20documento%20completo.pdf
- Comercial office of Perú in taipei*. (s.f.). Obtenido de
http://www.peru.org.tw/web/data/file/userfiles/files/natural%20products/ficha_sachainchi.pdf
- Dejtrakulwong, C. &. (2014). Four Zones Modeling of the Downdraft Biomass Gasification Process: Effects of Moisture Content and Air to Fuel Ratio. *Energy Procedia* 52, 142-149.
- Gulteros, H. J. (2014). <http://sachainchilibano.blogspot.com.co>. Obtenido de
<http://sachainchilibano.blogspot.com.co>
- Manco, E. (Junio de 2006). *CULTIVO DE SACHA INCHI*. Obtenido de
<http://www.incainchi.es/pdf/1358.pdf>
- Pirc, A. S. (2012). Universal Model of a Biomass Gasifier for Different Syngas Compositions. *Journal of Mechanical Engineering* 58, 291-299.
- Reed, T. B. (1998). *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems (1st ed.)*. Golden, Colorado, USA: The Biomass Energy Foundation Press.
- Reklaitis, G. V. (1986). *Balances de Materia y Energía (1st ed.)*. México, D.F.: Nueva Editorial Interamericana.
- Rodriguez, C. &. (2011). Adiabatic Gasification and Pyrolysis of Coffee Husk Using Air-Steam for Partial Oxidation. *Journal of combustion*, 1-9.
- S. Jarungthammachote, A. D. (2007). Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier. *Energy* 32, 1660–1669.
- T.H. Jayah, L. A. (2003). Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying. *Biomass and Bioenergy* 25, 459-469.

Valencia, J. L. (2011). *CULTIVO DE SEMILLAS OLEAGINOSAS O DE FRUTAS (MANIES) Y NUECES OLEAGINOSAS*. Obtenido de

es.scribd.com/doc/102709905/Monografia-Sacha-Inchi

Wikipedia - La enciclopedia libre. (14 de 07 de 2016). *Wikipedia - La enciclopedia libre*.

Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/MATLAB>